



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

**ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL
PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA
METODOLOGÍA MARSHALL**

Carlos André Abad Hurtarte

Asesorado por el Ing. José Juan Istupe Ibáñez

Guatemala, junio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL
PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA
METODOLOGÍA MARSHALL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ANDRÉ ABAD HURTARTE
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ JUAN ISTUPE IBÁÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL
PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA
METODOLOGÍA MARSHALL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 13 de mayo de 2020.

Carlos André Abad Hurtarte




Guatemala, 22 de marzo de 2022

Ingeniero Civil
Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del Área de Materiales de Construcción
Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Montenegro:

Por medio de la presente le comunico que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación con el tema **“ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL”**; elaborado por el estudiante de Ingeniería Civil **Carlos André Abad Hurtarte**, quien se identifica con Registro Académico número **201603215** y Documento Personal de Identificación **3016 08555 0101**, considerando que dicho trabajo cumple los requisitos establecidos por la Escuela de Ingeniería Civil. Por lo anterior, doy mi aprobación y recomiendo para su publicación.

Sin otro particular, me suscribo atentamente,


José Juan Istupe Ibañez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 16,089
Acta 008/2017-2019 de fecha 15-12-2017
Ing. Civil José Juan Istupe Ibañez
Asesor de trabajo de graduación



Guatemala, 18 de abril de 2,022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL”**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, Carlos André Abad Hurtarte , quién contó con la asesoría del Ing. José Juan Istupe Ibáñez.

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 Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.



LNG.DIRECTOR.139.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL**, presentado por: **Carlos André Abad Hurtarte**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, junio de 2022



LNG.DECANATO.OI.462.2022

La Decana 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: **ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL**, presentado por: **Carlos André Abad Hurtarte**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, junio de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Juan Carlos Abad Coronado e Ingrid Carolina Hurtarte Cabrera, por brindarme todo su cariño, apoyo incondicional y todos los recursos necesarios a lo largo de mi carrera. Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas.

Mi tía

Luz Angélica Abad Coronado, por alentarme a siempre seguir adelante y ser un pilar fundamental en mi preparación académica.

Mis abuelas

Lucila Guillermina Coronado Reyes y Clemencia Aracely Hurtarte Cabrera, por ser una importante influencia en mi carrera y ser una fuente de inspiración en cada aspecto de mi vida.

Mi hermana

Andrea Sofía Castillo Hurtarte, por estar ahí e inspirarme a ser un mejor ser humano.

Mi familia

Todos los demás miembros de mi familia, por estar ahí, brindarme su apoyo y cariño a lo largo de toda mi carrera.

Mis amigos

A todos aquellos a quienes conocí durante mi carrera y a los que estuvieron desde antes, dándome aliento y ánimos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y brindarme la oportunidad de crecimiento académico y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por acogerme y proporcionarme los conocimientos que hacen que hoy pueda desempeñarme en el ámbito profesional.
Mis amigos de la Facultad	Por su amistad y apoyo. Especialmente a Darlin Andrea Pereda Gálvez, Diego Antonio Soto Castañeda, Jorge Antonio Aldana López, Noé David Ren Mateo, Otto René Calderón Anleu, Marcela Fernanda Méndez Lemus y Víctor Manuel Flores Rojas.
Mi asesor y amigo	Ing. José Juan Istupe Ibáñez, por su amistad, motivación, apoyo incondicional y asesoría para concluir con el presente trabajo de graduación.
Catedráticos de la Facultad de Ingeniería	Por ser una importante influencia en mi carrera, en especial a Ing. José Gabriel Ordoñez Morales e Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. GENERALIDADES DEL ASFALTO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Historia	2
1.3. Concreto asfáltico	3
1.4. Definición.....	4
1.5. Composición química del asfalto	4
1.6. Propiedades físicas del asfalto	5
1.6.1. Durabilidad.....	6
1.6.1.1. Factores que afectan la durabilidad.....	7
1.6.1.2. Ensayos de durabilidad	9
1.6.1.2.1. El ensayo de película delgada (TFO).....	10
1.6.2. Pureza	11
1.6.3. Adhesión y cohesión	12
1.6.4. Endurecimiento y envejecimiento.....	12
1.6.5. Susceptibilidad a la temperatura	15
1.6.5.1. Aprovechamiento de la susceptibilidad térmica	16

1.7.	Clasificación de los asfaltos	18
1.7.1.	Cementos asfálticos	18
1.7.1.1.	Caracterización por penetración	20
1.7.1.2.	Caracterización por viscosidad	21
1.7.1.3.	Caracterización por comportamiento ...	27
1.7.2.	Asfaltos rebajados	27
1.7.2.1.	Asfalto fluidificado	27
1.7.2.2.	Asfalto de curado rápido	28
1.7.2.3.	Asfalto de curado medio	29
1.7.2.4.	Asfalto de curado lento	30
1.7.3.	Asfalto emulsificado.....	30
1.7.3.1.	Emulsión aniónica.....	31
1.7.3.2.	Emulsión catiónica.....	32
1.7.3.3.	Clasificación según la velocidad de rotura	33
1.7.3.4.	Composición de las emulsiones asfálticas.....	33
2.	COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	35
2.1.	Cemento asfáltico	35
2.1.1.	Origen de los asfaltos	36
2.1.1.1.	Asfaltos naturales	36
2.1.1.1.1.	Manantiales	36
2.1.1.1.2.	Lagos.....	36
2.1.1.1.3.	Exudaciones	37
2.1.1.1.4.	Impregnando rocas	37
2.1.1.1.5.	Filones	37
2.1.1.2.	Derivados del petróleo	38

	2.1.1.2.1.	Refinación del petróleo	38
	2.1.1.2.2.	Refinación del asfalto	38
2.1.2.		Composición del asfalto	40
	2.1.2.1.	Estructura coloidal.....	42
	2.1.2.1.1.	Los asfaltenos	44
	2.1.2.1.2.	Los maltenos.....	46
	2.1.2.1.3.	Las resinas y los aceites.....	47
2.1.3.		Propiedades de los asfaltos	48
	2.1.3.1.	Propiedades reológicas y comportamiento en servicio.....	48
2.1.4.		Ensayos para determinar las propiedades de los cementos asfálticos	50
	2.1.4.1.	Penetración.....	50
	2.1.4.2.	Viscosidad.....	52
	2.1.4.3.	Punto de inflamación.....	55
	2.1.4.4.	Ductilidad	56
	2.1.4.5.	Solubilidad	57
	2.1.4.6.	Peso específico.....	57
2.2.		Agregados pétreos	58
	2.2.1.	Definición de agregados pétreos.....	58
	2.2.2.	Clasificación de agregados	59
	2.2.2.1.	Rocas sedimentarias.....	59
	2.2.2.2.	Rocas ígneas	60
	2.2.2.3.	Rocas metamórficas.....	60
	2.2.3.	Tipos de agregados pétreos según su fuente	61
	2.2.3.1.	Agregados naturales	61
	2.2.3.2.	Agregados procesados	62

2.2.3.3.	Agregados artificiales	64
2.2.4.	Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño.....	64
2.2.4.1.	Agregado fino	65
2.2.4.2.	Agregado grueso	65
2.2.4.3.	Polvo mineral o <i>filler</i>	65
2.2.5.	Características de los agregados gruesos para su utilización en mezclas asfálticas	65
2.2.5.1.	Abrasión (AASHTO T 96)	66
2.2.5.2.	Desintegración al sulfato de sodio (AASHTO T 104)	66
2.2.5.3.	Caras fracturadas (ASTM D 5821-95).....	66
2.2.5.4.	Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791).....	66
2.2.6.	Características de los agregados finos para su utilización en mezclas asfálticas	66
2.2.6.1.	Equivalente de arena (AASHTO T 176)	67
2.2.6.2.	Índice plástico (AASHTO T 90)	67
2.2.6.3.	Graduación N°2 o N°3 (AASHTO M 29).....	67
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	69
3.1.	Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla asfáltica	69
3.1.1.	Gravedad específica <i>Bulk</i>	69
3.1.1.1.	Memoria de cálculo.....	69
3.1.1.2.	Resultados.....	70
3.1.2.	Gravedad específica bruta de los agregados.....	73

	3.1.2.1.	Memoria de cálculo	73
	3.1.2.2.	Resultados	74
3.1.3.		Gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i>	75
	3.1.3.1.	Muestra de cálculo	75
	3.1.3.2.	Resultados	76
3.1.4.		Gravedad específica efectiva de los agregados	78
	3.1.4.1.	Muestra de cálculo	78
	3.1.4.2.	Resultados	80
3.1.5.		Peso unitario de la mezcla asfáltica	81
	3.1.5.1.	Muestra de cálculo	81
	3.1.5.2.	Resultados	82
3.1.6.		Porcentaje de vacíos-densidad	85
	3.1.6.1.	Muestra de cálculo	85
	3.1.6.2.	Resultados	86
3.1.7.		Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	87
	3.1.7.1.	Muestra de cálculo	87
	3.1.7.2.	Resultados	89
3.1.8.		Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.....	90
	3.1.8.1.	Muestra de cálculo	90
	3.1.8.2.	Resultados	91
3.1.9.		Relación relleno mineral / asfalto	93
	3.1.9.1.	Muestra de cálculo del porcentaje de ligante asfáltico absorbido	93
	3.1.9.2.	Resultados del porcentaje de ligante asfáltico absorbido	95
	3.1.9.3.	Muestra de cálculo del porcentaje de ligante asfáltico efectivo	96

3.1.9.4.	Resultados del porcentaje de ligante asfáltico efectivo	97
3.1.9.5.	Muestra de cálculo de relación relleno mineral/asfalto.....	99
3.1.9.6.	Resultados de relación relleno mineral/asfalto	100
3.1.10.	Contenido de humedad	101
3.1.10.1.	Muestra de cálculo.....	102
3.1.10.2.	Resultados.....	103
3.1.11.	Estabilidad-Flujo Marshall.....	105
3.1.11.1.	Muestra de cálculo.....	105
3.1.11.2.	Resultados.....	108
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
4.1.	Análisis e interpretación de resultados	111
4.1.1.	Diseño para granulometría en gravedad específica <i>Bulk</i>	113
4.1.2.	Diseño para granulometría en gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i>	114
4.1.3.	Diseño para granulometría de gravedad específica efectiva de los agregados	116
4.1.4.	Diseño para peso unitario de la mezcla	117
4.1.5.	Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos-densidad	119
4.1.6.	Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos en agregado mineral	121
4.1.7.	Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico.....	123

4.1.8.	Diseño para granulometría en relación de relleno mineral/asfalto.....	125
4.1.9.	Diseño para granulometría en porcentaje de contenido de humedad.....	126
4.1.10.	Diseño para granulometría en estabilidad Marshall	128
4.1.11.	Diseño para granulometría en flujo Marshall	130
CONCLUSIONES		133
RECOMENDACIONES.....		137
BIBLIOGRAFÍA.....		139
APÉNDICES.....		143
ANEXOS		153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ensayo al horno en película delgada.....	10
2.	Ensayo de película fina rotativa.....	11
3.	Variación de la reología del cemento asfáltico con la temperatura	16
4.	Curva de susceptibilidad térmica de cementos asfálticos	17
5.	Comparación de la clasificación por grado de penetración y grado de viscosidad	25
6.	Susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos, según el grado de viscosidad	26
7.	Fases de una emulsión asfáltica	31
8.	Materiales asfálticos para pavimentación	35
9.	Productos y temperaturas típicas de destilación	40
10.	Esquema coloidal de Pfeiffer.....	42
11.	Concentración máxima de la fase dispersante	44
12.	Macroestructura de los asfaltenos.....	45
13.	Curva de flujo de un cemento asfáltico.....	49
14.	Diagrama de la prueba de penetración	51
15.	Viscosímetro de tubo capilar en un baño de temperatura constante	53
16.	Determinación de la viscosidad Saybolt-Furol.....	54
17.	Pruebas de punto de inflamación: ensayo de copa abierta de Cleveland (izquierda); ensayo de Pensky-Martens (derecha)	56
18.	Prueba de ductilidad	57
19.	Grafica comparativa de gravedad específica <i>Bulk</i>	112
20.	Gráfica comparativa de gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i>	114

21.	Gráfica comparativa de gravedad específica efectiva de los agregados	115
22.	Gráfica comparativa de peso unitario en la mezcla.....	117
23.	Gráfica comparativa de porcentaje vacíos-densidad.....	118
24.	Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	120
25.	Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico	122
26.	Gráfica comparativa de relación de relleno mineral/asfalto	124
27.	Gráfica comparativa de porcentaje de contenido de humedad	126
28.	Gráfica comparativa de estabilidad Marshall.....	128
29.	Gráfica comparativa de flujo Marshall	130

TABLAS

I.	Composición química del asfalto	5
II.	Especificación según el grado de penetración (ASTM D 946)	20
III.	Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C.....	22
IV.	Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C.....	23
V.	Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C.....	24
VI.	Grados de viscosidad en asfaltos de curado rápido.....	29
VII.	Grados de viscosidad en asfaltos de curado medio.....	29
VIII.	Requisitos de clasificación para agregados finos.....	67
IX.	Resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> , arena de río	71
X.	Resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> , arena triturada	71
XI.	Resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> , arena comercial	72

XII.	Resultados de gravedad específica bruta de los agregados	75
XIII.	Resultados de gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i> , arena de río.....	77
XIV.	Resultados de gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i> , arena triturada.....	77
XV.	Resultados de gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i> , arena comercial.....	78
XVI.	Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena de río.....	80
XVII.	Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena triturada.....	80
XVIII.	Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena comercial.....	81
XIX.	Resultados de peso unitario, arena de río	83
XX.	Resultado de peso unitario, arena triturada.....	83
XXI.	Resultado de peso unitario, arena comercial.....	84
XXII.	Resultados de vacío-densidad, arena de río	86
XXIII.	Resultados de vacío-densidad, arena triturada	87
XXIV.	Resultados de vacío-densidad, arena comercial	87
XXV.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena de río.....	89
XXVI.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena triturada.....	89
XXVII.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena comercial.....	90
XXVIII.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena de río.....	92
XXIX.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena triturada.....	92

XXX.	Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena comercial	93
XXXI.	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena de río.....	95
XXXII.	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena triturada.....	95
XXXIII.	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena comercial.....	96
XXXIV.	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena de río	98
XXXV.	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena triturada	98
XXXVI.	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena comercial.....	98
XXXVII.	Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena de río.....	100
XXXVIII.	Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena triturada.....	101
XXXIX.	Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena comercial	101
XL.	Resultados de contenido de humedad, arena de río.....	103
XLI.	Resultados de contenido de humedad, arena triturada	104
XLII.	Resultados de contenido de humedad, arena comercial.....	105
XLIII.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena de río.....	108
XLIV.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena triturada	109
XLV.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena comercial.....	109
XLVI.	Comparación de gravedad específica <i>Bulk</i>	112
XLVII.	Comparación de gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i>	113
XLVIII.	Comparación de gravedad específica efectiva de los agregados	115
XLIX.	Comparación de peso unitario en la mezcla	116
L.	Comparación de porcentaje vacíos-densidad	118
LI.	Comparación de porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	120
LII.	Comparación de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico	122
LIII.	Comparación de relación de relleno mineral/asfalto.....	124
LIV.	Comparación de porcentaje de contenido de humedad	125
LV.	Comparación de estabilidad Marshall	127
LVI.	Comparación de flujo Marshall.....	129

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC-20	Asfalto convencional
AC	Cemento asfáltico
cm	Centímetro
Deflt	Deformación igual a 0.0001”
°C	Grados centígrados
g	Gramo
Gmb	Gravedad específica Bulk
Gfino	Gravedad específica del agregado fino
Ggrueso	Gravedad específica del agregado grueso
Gac	Gravedad específica del ligante asfáltico
Gse	Gravedad específica efectiva de los agregados
Gmm	Gravedad específica teórica máxima Rice
m	Metro
mm	Milímetro
%	Porcentaje
%H	Porcentaje de humedad
Pba	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido
Pbe	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo
“	Pulgada

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
Abrasión	Acción mecánica de rozamiento de dos superficies la una contra la otra que ocasiona la erosión y desgaste (ruptura de partículas) de una o de ambas superficies.
Absorción	Es la masa de agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado, sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado después de secado a 110 ± 5 °C.
Agregado	Material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente.
Agregado fino	Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4).
Agregado grueso	Agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (No. 4).
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

Asfalto	Sustancia de color negro que procede de la destilación del petróleo crudo, se encuentra en grandes depósitos naturales, y se utiliza frecuentemente para pavimentar carreteras.
Bitumen	Un tipo de sustancia cementante de color negro u oscuro (sólida, semisólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas (o alquitranes), los betunes y las asfálticas.
Briqueta	Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos.
Capacidad	Habilidad que tiene una mezcla asfáltica para servir al tráfico para el cual ha sido diseñado.
Cemento asfáltico	Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción de pavimentos asfálticos.
Cohesión	Propiedad que conserva a un cuerpo sólido en su forma, para resistir a las aplicaciones de fuerzas externas.
Compactación	El acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño.

Comportamiento	De la mezcla asfáltica. Puede ser definido como su capacidad para servir al tráfico a lo largo del tiempo.
Concreto asfáltico	Una mezcla en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad) y agregado bien gradado (también de alta calidad), compactada muy bien para formar una masa densa y uniforme.
Consistencia	Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura.
Contenido de asfalto	Cantidad de materiales minerales (finos y gruesos) que deben ser agregados a la mezcla para provocar los resultados deseados.
Densidad	El grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada y que solo está limitado por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la masa.
Estabilidad	La habilidad de una mezcla asfáltica de pavimentación de resistir deformación bajo las cargas impuestas.
F/A	Relación relleno mineral / asfalto.
Fluencia	Deformación que sufre la probeta al ser sometida bajo la carga de estabilidad Marshall.

Granulometría	Propiedad más característica del suelo. Estudia la distribución de las partículas que conforman un suelo según su tamaño.
MAC	Mezcla asfáltica en caliente. Consiste en una mezcla de cemento asfáltico con agregados, que cumple con granulometría fabricada en planta.
PG	<i>Performance grade</i> (grado de desempeño).
Penetración	La consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia en décimas de milímetro (0,1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente en una muestra de material, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.
Picnómetro	Instrumento de medición que se utiliza para determinar el peso específico o densidad de un fluido.
Polvo mineral	La porción del agregado fino que pasa por el tamiz No. 200.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para un estudio determinado del material del que está constituido.
Sheet Asphalt	Mezcla en caliente de betún asfáltico, arena limpia bien graduada de partículas angulosas y <i>filler</i> mineral. Normalmente solo se emplea en capas de

superficie, extendidas usualmente sobre una carga de enlace o de nivelación.

Tamaño máximo nominal Es el menor tamiz por el cual la mayor parte de agregado puede pasar. El tamiz del tamaño máximo nominal puede retener del 5 % al 15 % de la masa.

Tamiz Aparato, en un laboratorio, usado para separar tamaños de material, y donde las aberturas son cuadradas.

Tamizado Método de separación de elementos de diferente tamaño que permite el paso de los más pequeños y retiene a los mayores.

Tara Recipiente utilizado para transportar una muestra de determinado material.

VA Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

VAM Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Viscosidad Característica del fluido mediante la cual ofrece resistencia al esfuerzo de corte. Es un método usado para medir la consistencia del asfalto.

Volumen de vacíos Cantidad total de espacios vacíos en una mezcla asfáltica compactada.

RESUMEN

En un diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall, el cemento asfáltico y los agregados pétreos son combinados bajo proporciones controladas, determinando estas las propiedades físicomecánicas de la mezcla y su desempeño ante la aplicación de cargas. El agregado fino utilizado para un determinado diseño de mezcla juega un papel de vital importancia debido al porcentaje en peso que este presenta del total de la mezcla asfáltica. En el presente documento se realiza el análisis de tres diseños de mezcla asfáltica mediante la aplicación del método Marshall con granulometría tipo E (12,5 mm), uso de cemento asfáltico con nomenclatura AC-20 e implementación de arena de río, arena triturada y arena comercial. Los capítulos que se abordan son los siguientes:

En el capítulo uno se describen las generalidades del asfalto; antecedentes, historia, definiciones importantes sobre el concreto asfáltico, composición química, propiedades físico-mecánicas y la clasificación de los tipos de cemento asfáltico. Para una mezcla asfáltica es necesario tener en cuenta cada uno de los factores, características y propiedades de los componentes y realizar un estudio minucioso de cada uno de ellos, ya que estos influyen en el diseño.

El capítulo dos comprende todo sobre los componentes de una mezcla asfáltica, como el origen de los asfaltos, su clasificación, su composición química, propiedades reológicas y comportamiento en servicio, así como los ensayos respectivos para el control de calidad y caracterización. También se incluyen clasificaciones de los diferentes tipos de agregados pétreos,

características de los agregados gruesos y finos para su utilización en mezclas asfálticas, ensayos de control de calidad y caracterización.

En los capítulos tres y cuatro se establece el desarrollo experimental y el análisis de los resultados obtenidos en cada ensayo de laboratorio, respectivamente. En estos se realizan cuadros y gráficas comparativas para cada uno de los ensayos de los diseños de mezcla realizados, conjuntamente con los respectivos análisis para el tema de investigación: *Alternativa de uso de arena triturada, arena de río y arena comercial para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, mediante la metodología Marshall.*

OBJETIVOS

General

Establecer una matriz de comparación de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, diseñadas mediante la metodología Marshall, empleando diferentes tipos de agregado fino, específicamente arena triturada, arena de río y arena comercial.

Específicos

1. Caracterizar los tipos de asfaltos y los diferentes componentes de una mezcla asfáltica en caliente.
2. Establecer cómo se modifican las propiedades volumétricas con respecto al origen de la arena utilizada para el diseño de la mezcla.
3. Determinar el aumento o disminución de la cantidad de cemento asfáltico en las mezclas asfálticas en relación al tipo de agregado fino o arena utilizada.
4. Fijar las diferencias en las propiedades físicomecánicas que se encuentran al realizar el diseño de una mezcla asfáltica por el método Marshall al implementar, para estos, diferentes tipos de arenas de distinta procedencia.

INTRODUCCIÓN

La calidad de servicio que va a brindar una carretera depende del diseño estructural, de la eficiencia con la que se llevan a cabo los procesos constructivos y de los materiales que son empleados para su construcción. Cada uno de estos factores es de vital importancia, sin embargo, las características y propiedades de los materiales son un factor preponderante al momento de realizar el control de calidad, por lo que se debe tener sumo cuidado y atención a esta variable en el momento de encontrarse en un proyecto de carreteras.

En el diseño de mezclas asfálticas se deben considerar varios factores y parámetros dentro de los cuales se tiene que presentar cada uno de sus componentes, en este caso, los agregados pétreos y el cemento asfáltico.

Dentro los factores más importantes que se consideran a la hora de realizar una mezcla asfáltica están los factores físicos, mecánicos y económicos de cada uno de los agregados, y esto dependerá exclusivamente de dónde se obtengan los mismos.

Los requisitos de estos materiales para su utilización en un diseño de mezcla asfáltica se encuentran en la normativa ASTM D 3515, presentando las especificaciones de los ensayos: equivalente de arena, índice plástico, granulometría y porcentaje de absorción.

Dentro de los agregados pétreos, el agregado fino es el que presenta mayor influencia en el diseño, esto debido al porcentaje en peso que se utiliza de este, ya que dependiendo de su peso específico, porcentaje de vacíos, características mineralógicas y presencia de finos es que se definirá la cantidad de bitumen que se necesitará para dicho diseño de mezcla.

1. GENERALIDADES DEL ASFALTO

1.1. Antecedentes

Los orígenes de las mezclas bituminosas empleadas en firmes asfálticos se remontan a 1830, cuando el alquitrán se utiliza en algunos riegos superficiales en la pavimentación de carreteras. Sin embargo, los primeros aglomerados realizados *in situ* con alquitrán se ejecutaron hacia 1850 en algunas carreteras y vías urbanas del Reino Unido. A partir de ese momento la técnica se desarrolla en paralelo con la iluminación con gas ciudad, en cuya fabricación se obtiene dicho ligante como subproducto.

En España se pavimentan con alquitrán las zonas peatonales de la Puerta del Sol de Madrid entre 1847 y 1854. En torno a 1870, en Estados Unidos, se empiezan a utilizar mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales, si bien estos materiales ya habían sido empleados en algunas pavimentaciones en Burdeos y Lyon en 1810. Más tarde, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comienza a emplear betunes de destilación.

A finales del siglo XIX el norteamericano C. Richardson sentó las bases de la tecnología de las mezclas bituminosas para pavimentación. Después de la I Guerra Mundial surge la industria de la fabricación en central de las mezclas bituminosas, aunque es después de la II Guerra Mundial cuando se produce un gran desarrollo tecnológico de estos materiales, debido principalmente a las

grandes necesidades de construcción acelerada de pistas de aterrizaje militares.¹

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.²

En la actualidad existen diversos métodos de diseño de mezclas asfálticas con los cuales se determinan las proporciones exactas de bitumen y agregados pétreos en una mezcla. Hoy en día en Guatemala, el método que se utiliza con mayor frecuencia es el método Marshall. Este método contiene características y ventajas singulares. El método Marshall puede ser utilizado con resultados satisfactorios.

1.2. Historia

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. La palabra asfalto deriva del acadio, lengua hablada en Asiria, en las orillas del Tigris superior, entre los años 1400 y 600 A.C. En esta zona se encuentra en efecto la palabra Sphalto que significa lo que hace caer. Luego la palabra fue adoptada por el griego, pasó al latín y, más adelante, al francés (*asphalte*), al español (asfalto) y al inglés (*asphalt*). Estudios arqueológicos indican que es uno de los materiales constructivos más antiguos que el hombre ha utilizado.³

- Prehistoria. Se han encontrado esqueletos de animales prehistóricos conservados intactos hasta nuestros días en depósitos superficiales de asfalto en el pozo La Brea, en Los Ángeles de California.
- 3200 a 540 a. J.C. Excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y en el valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.

¹ Victoryepes. *Evolución histórica de la fabricación de mezclas bituminosas*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/mezcla-asfaltica/>. Consulta: 14 de mayo de 2020.

² Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. p. 57.

³ Asfalto.com. *Historia del Asfalto*. http://www.e-asfalto.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm. Consulta: 15 de mayo de 2020.

- 300 a. J.C. El asfalto se emplea extensamente en Egipto en los embalsamamientos.
- 1802 d. 3.C. En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
- 1838 d. J.C. En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
 - 1870 d. J.C. (aproximadamente). Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey, por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
 - 1876 d. 3.C. Construcción del primer pavimento de tipo *sheet asphalt* en Washington D. C., con asfalto de lago importado.
 - 1902 d. J.C. En los Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 20 000 t de asfalto por año.
 - A partir de 1924. El asfalto de petróleo producido anualmente en Estados Unidos ha crecido constantemente desde 3 millones de toneladas en 1924 a unos 9 millones de toneladas en 1946. A partir de esta fecha, se ha más que duplicado, llegando a unos 19 millones de toneladas en 1956.⁴

1.3. Concreto asfáltico

“Mezcla en caliente, de alta calidad y perfectamente controlada, de betún asfáltico y áridos de alta calidad bien graduados, que se compactan perfectamente hasta formar una masa densa y uniforme”.⁵

Esta mezcla es apta para su colocación y compactación inmediata en una carretera, ya sea en una o varias capas proporcionándole las características y propiedades de resistencia, flexibilidad, permeabilidad y textura a la carpeta de rodadura según sea el caso y el diseño.

⁴ The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 23-24.

⁵ *Ibíd.* p. 33.

1.4. Definición

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales el material se encuentra prácticamente libre de materias extrañas, mientras que en otros está mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias. Las rocas porosas saturadas de asfalto que se encuentran en algunos yacimientos naturales se conocen con el nombre de rocas asfálticas.⁶

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 como tales o que se obtienen en la destilación del petróleo. El asfalto entra en proporciones variables en la constitución de la mayor parte de los crudos del petróleo.

Definición de los asfaltos dada por la ASTM:

Materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licúan 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 combinaciones de éstos entre sí o con el petróleo o productos derivados de estas combinaciones. (ASTM Standard D8).⁷

1.5. Composición química del asfalto

Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación. Al igual que el petróleo crudo, el asfalto es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono.

La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse

⁶ The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 21.

⁷ *Ibíd.* p. 28.

en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua.

Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados (asfáltenos) están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros (resinas), sin que exista una separación entre ellas, sino una transición, finalmente, ocupando el espacio restante los aceites.

Un concepto más amplio sobre la constitución es que el asfalto consta de tres componentes mayoritarios. El primero se describe como una mezcla de asfáltenos que son moléculas complejas de alto peso molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el benceno. El segundo componente descrito es una mezcla de resinas y el tercero aceite mineral.

Estos tres constituyen un sistema coloidal como el explicado anteriormente. Los asfáltenos cargan con la responsabilidad de las características estructurales y de dureza de los asfaltos, las resinas le proporcionan sus propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia adecuada para hacerlos trabajables. Los asfaltos contienen fracciones bituminosas insolubles en parafinas. Como ya se dijo, cerca del 90 al 95 % del peso del asfalto está compuesto por carbono e hidrógeno, o lo que se había denominado como hidrocarburos.⁸

Tabla I. **Composición química del asfalto**

COMPOSICION QUIMICA DEL ASFALTO	
ELEMENTO	PORCENTAJE (%)
CARBONO	70 - 85
HIDROGENO	7 - 12
AZUFRE	2 - 8
OXIGENO	1 - 7
NITROGENO Y OTROS METALES	0 - 1

Fuente: Civilgeeks.com. *Material asfáltico*. <https://civilgeeks.com/2015/06/16/material-asfaltico/>.

Consulta: 14 de mayo de 2020.

1.6. Propiedades físicas del asfalto

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero.

⁸ EcuRed. *Asfalto*. <https://www.ecured.cu/Asfalto>. Consulta: 14 de mayo de 2020.

Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales.

Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.⁹

“Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento”.¹⁰

1.6.1. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas: usando la mayor cantidad posible del asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo

⁹ The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 21.

¹⁰ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 17.

hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos minerales como la cal hidratada.

“La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos asociados con una poca durabilidad del pavimento”.¹¹

1.6.1.1. Factores que afectan la durabilidad

La característica del cemento asfáltico es un factor de primordial importancia en la durabilidad de las capas de rodadura asfálticas, si los diseños

¹¹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 62.

de la estructura del pavimento y de la mezcla han sido los correctos y se ha realizado un buen control de calidad sobre el proceso constructivo.

Existen seis factores que contribuyen al proceso de envejecimiento de un cemento asfáltico durante el proceso de mezclado o servicio:

- La oxidación. Es la reacción del oxígeno del aire con los componentes químicos del cemento asfáltico. La velocidad y la magnitud de la oxidación dependerán de las características del cemento asfáltico y de la mezcla asfáltica, así como de la temperatura del aire.
- La volatilización. Es la evaporación de los solventes más livianos. Inicialmente, es función de la temperatura. No es un factor que contribuya al envejecimiento a largo plazo del asfalto bajo las condiciones de servicio.
- La polimerización. Es una combinación de moléculas afines para formar enlaces débiles carbono-carbono en grandes cadenas lineales causando un endurecimiento progresivo del cemento asfáltico. No existe una evidencia científica de que sea un factor importante en el envejecimiento del asfalto en servicio.
- La tixotropía. Es el endurecimiento progresivo por la formación de una estructura dentro del asfalto durante un periodo de tiempo, la cual puede ser destruida por recalentamiento o durante el servicio de la mezcla asfáltica. La tixotropía está asociada a pavimentos que tienen poco o nulo tránsito y es función de la composición química del cemento asfáltico.

- La sinéresis. Es una reacción de oxidación mediante la cual los aceites menos viscosos fluyen hacia la superficie de la película de ligante, por lo cual el cemento asfáltico se endurece rápidamente.
- La separación. Es la remoción de los aceites, resinas y asfáltenos que constituyen el cemento asfáltico, causado por una adsorción selectiva de agregados de alta porosidad.

Todos estos factores que contribuyen al envejecimiento prematuro de un cemento asfáltico van a actuar en mayor o menor grado en las siguientes condiciones o etapas de trabajo:

- “Durante el proceso de mezclado en planta
- Durante la vida útil del pavimento”¹²

1.6.1.2. Ensayos de durabilidad

Los cementos asfálticos sufren un mayor o menor grado de envejecimiento cuando son mezclados con los agregados en una planta asfáltica en caliente. El envejecimiento continúa durante toda la vida del pavimento por la acción del medio ambiente y otros factores. Los siguientes ensayos son utilizados para medir de manera más o menos aproximada el envejecimiento de un cemento asfáltico.¹³

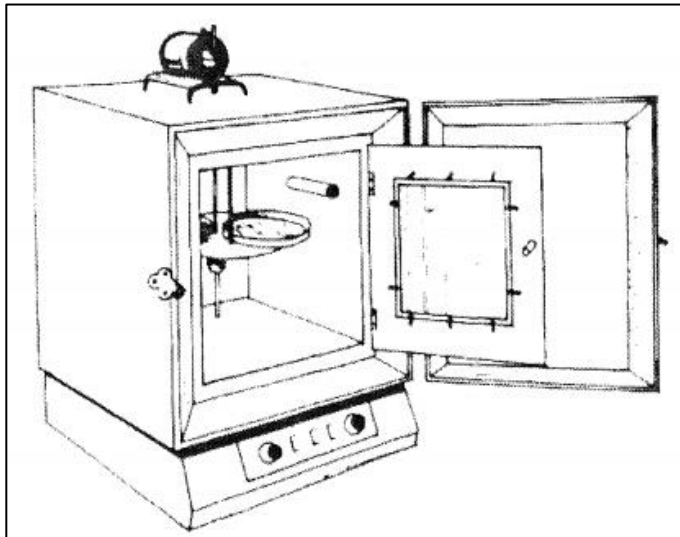
¹² ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 189 - 190.

¹³ *Ibíd.* p. 118 – 119.

1.6.1.2.1. El ensayo de película delgada (TFO)

El método es descrito en la norma ASTM D-1754 y se utiliza para simular en el laboratorio las condiciones que producen un aumento de la consistencia del asfalto durante las operaciones de mezclado en planta, lo cual significa poder medir el envejecimiento del cemento asfáltico durante esa operación. El ensayo consiste en colocar una película de asfalto de 3 mm de espesor en una cacerola y en un horno giratorio que se encuentra a una temperatura de 163 °C durante un tiempo de 5 horas. “El asfalto envejecido se somete a los ensayos de penetración, viscosidad o punto de ablandamiento, con el fin de calcular el porcentaje de pérdida de ablandamiento y el incremento de la viscosidad o relación de envejecimiento”.¹⁴

Figura 1. Ensayo al horno en película delgada



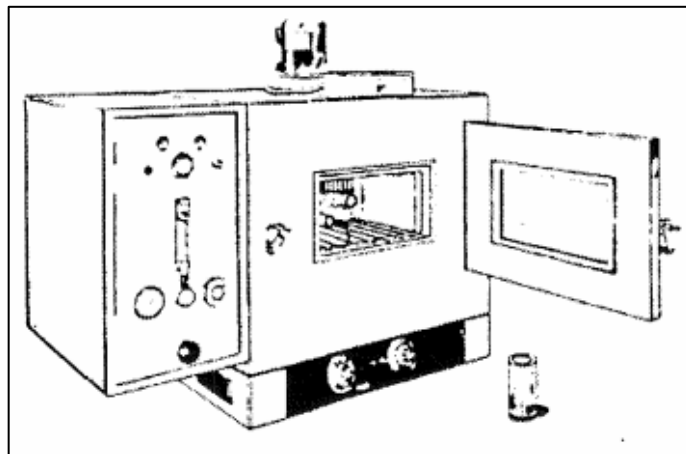
Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 119.

¹⁴ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 119.

Una variación del ensayo de película delgada, actualmente muy utilizado en los Estados Unidos, es el ensayo Rolling Thin Film Oven (RTOF) o película fina rotativa descrito en la norma ASTM D-2872. El cemento asfáltico se coloca dentro de un recipiente cilíndrico sobre una superficie que gira alrededor de un eje horizontal, manteniéndose una temperatura constante de 163 °C y sometida de manera continua a la acción del aire.

El grado de envejecimiento que se produce es similar al logrado con el ensayo de película delgada, pero en un tiempo menor (solo 75 minutos). Una ventaja adicional es la de poder ensayar un mayor número de muestras y obtener mayor cantidad de cemento asfáltico para la realización de los ensayos de caracterización del ligante envejecido.¹⁵

Figura 2. **Ensayo de película fina rotativa**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 120.

1.6.2. Pureza

Los cementos asfálticos están constituidos casi siempre por bitumen puro, el cual por definición es completamente soluble en bisulfuro de carbono. Solo

¹⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 120.

un porcentaje muy pequeño de impurezas está presente en el cemento asfáltico obtenido por refinería. Para determinar el grado de pureza del cemento asfáltico se utiliza el ensayo de solubilidad definido por la norma ASTM D-2042. Los máltenos, los constituyentes cementantes (resinas) y los asfáltenos, son solubles en bisulfuro de carbono, tricloroetileno, tetracloruro de carbono y otros solventes orgánicos de bajo punto de ebullición, mientras que la materia inerte (no cementante) como sales, carbón libre o impurezas orgánicas son insolubles en estos solventes.

Una muestra de cemento asfáltico de peso conocido es disuelto en tricloroetileno y se pasa a través de un *goosh* con asbesto. El material retenido en el filtro se lava varias veces y la parte insoluble constituye las impurezas del cemento asfáltico. Las especificaciones por lo general exigen un mínimo del 99 % de solubilidad en tricloroetileno.¹⁶

1.6.3. Adhesión y cohesión

La adhesión en los asfaltos se refiere a la capacidad del cemento asfáltico para fluidificarse a altas temperaturas y adherirse a los agregados pétreos después de enfriarse en la mezcla asfáltica y mantener estas características al estar bajo la presencia de agua o de cargas vehiculares.

La cohesión se define como la capacidad que tienen los asfaltos para mantener en su lugar las partículas de los agregados en la mezcla compactada y enfriado a temperatura ambiente.

1.6.4. Endurecimiento y envejecimiento

El proceso de envejecimiento del cemento asfáltico en el pavimento es de larga duración. Aunque el cemento asfáltico es sometido a temperaturas

¹⁶ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 120 - 121.

moderadas, las características propias de la mezcla pueden llegar a afectar de manera irreversible su durabilidad. Una vez puesta en obra la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo la acción del oxígeno, catalizada por la radiación ultravioleta de la luz solar, y la elevación de temperatura propician la oxidación de las moléculas más susceptibles y como consecuencia un envejecimiento del ligante.

Los asfaltos tienen una gran capacidad para absorber la luz. La reacción de oxidación del asfalto catalizada por la luz (fotooxidación), tiene lugar en los primeros 5 micrones de película de asfalto expuesta. En ausencia de luz esta oxidación es más lenta y tiene lugar especialmente en el interior de la capa asfáltica. La velocidad de reacción de oxidación está influenciada por la temperatura del aire y es duplicada por cada 10 °C de aumento de la misma, lo cual hace que la temperatura del aire sea un factor que incida en la velocidad y magnitud de la oxidación del cemento asfáltico.

Los pavimentos más expuestos a la acción de la luz y aire serán los que se construyan en climas tropicales, por lo cual es recomendable que las mezclas asfálticas diseñadas tengan el mayor contenido de asfalto, compatible con sus características mecánicas, para proveer un mayor espesor de película de ligante, con lo cual el oxígeno tendrá un largo camino por difundir a través de la misma.

Otro factor que provoca el endurecimiento del ligante asfáltico es la característica de los finos. Aunque no se comprobado que el incremento de finos durante la vida del pavimento cause un alto grado de rigidización del asfalto y la capa asfáltica, sí se aumenta la viscosidad del asfalto, alterando muy poco sus características reológicas.

De todos los factores descritos como causales de envejecimiento del asfalto, la principal causa de endurecimiento y fragilidad del asfalto con el tiempo es la oxidación atmosférica de ciertas moléculas del asfalto, por la formación de grupos funcionales que contienen oxígeno, altamente polares y de fuerte interacción química. Como resultado final, los ligantes presentan una mayor o menor evolución o envejecimiento.

Dichas alteraciones van a modificar sus propiedades de flujo y su consistencia; el cemento asfáltico va perdiendo su poder ligante, se torna frágil y quebradizo permitiendo que el agua penetre a través de la película y desplace el asfalto con el consiguiente deterioro de la mezcla. En esta etapa la evaporación no es importante debido a las temperaturas moderadas que se presentan en la mezcla asfáltica y el alto peso molecular de los compuestos del asfalto.

En servicio, el envejecimiento del cemento asfáltico es función del tiempo, la temperatura, el contenido de ligante asfáltico, la absorción del agregado, el espesor de película alrededor de las partículas y las características propias del ligante asfáltico.

En este aspecto juegan un papel muy importante los controles que sobre el diseño de la mezcla y el proceso constructivo realicen los organismos técnicos encargados de los mismos. Se puede aumentar la durabilidad de una estructura de pavimento si aumentamos la durabilidad de la mezcla asfáltica mediante una adecuada compactación, minimizando el contenido de vacíos. Este factor, unido a un bajo contenido de cemento asfáltico, es quizá el que más contribuye al envejecimiento del asfalto.

Se debe evitar que el aire y el agua circulen libremente por la mezcla asfáltica compactada con el fin de disminuir los riesgos de que se presente un endurecimiento prematuro que conlleve a su rigidización y posterior fisuramiento por fatiga o cambios térmicos de la capa de rodadura asfáltica.

Con base en lo anterior, se puede afirmar que la durabilidad de una mezcla asfáltica y por lo tanto de la estructura del pavimento dependerán de la resistencia del cemento asfáltico a endurecerse por oxidación, del contenido de vacíos con aire presentes en la capa asfáltica y del contenido de ligante.¹⁷

1.6.5. Susceptibilidad a la temperatura

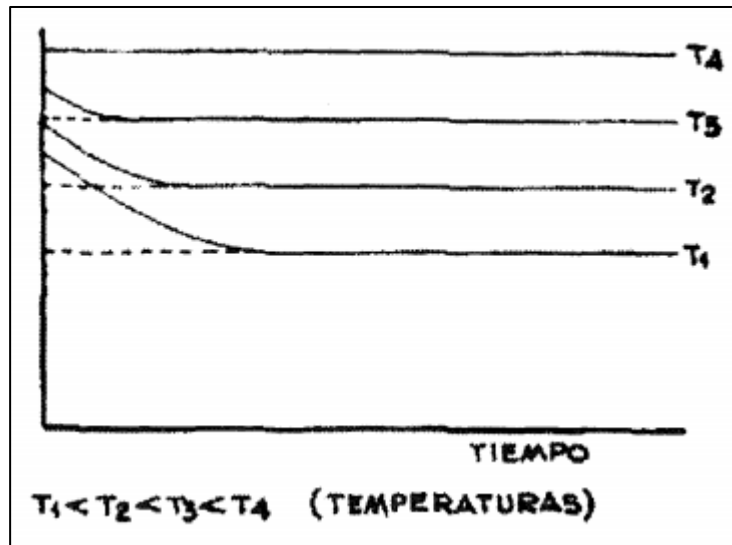
El cemento asfáltico es un material termoplástico. Su consistencia cambia con la temperatura, la magnitud y duración de la carga. La susceptibilidad térmica del cemento asfáltico se define como el cambio de la consistencia, medida generalmente por la viscosidad, con un cambio de la temperatura. Es una propiedad inherente que tiene todo cemento asfáltico y la cual es necesario manejar y aprovechar al máximo.

Los cementos asfálticos con un alto grado de susceptibilidad térmica no son deseables ya que su viscosidad a 135 °C puede ser muy baja, lo que puede ocasionar problemas durante los procesos de mezclado y compactación. Por otro lado, a bajas temperaturas de servicio su viscosidad puede ser muy alta, lo cual puede generar problemas de fisuramiento por contracciones térmicas.¹⁸

¹⁷ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 191 - 193.

¹⁸ *Ibíd.* p. 137 - 138.

Figura 3. **Variación de la reología del cemento asfáltico con la temperatura**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 138.

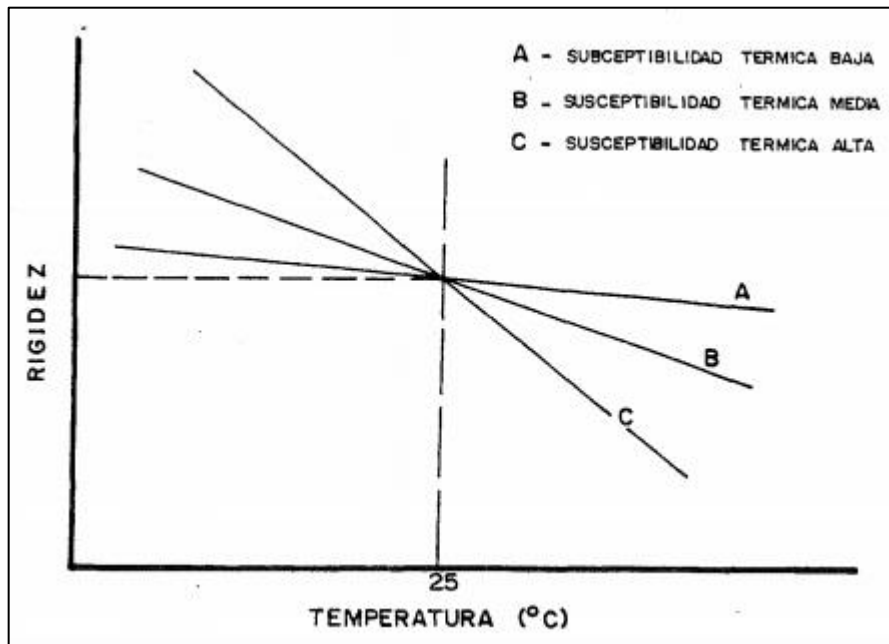
1.6.5.1. Aprovechamiento de la susceptibilidad térmica

Si un cemento asfáltico presenta una viscosidad muy baja a las altas temperaturas de servicio, se pueden generar ahuellamientos. Si por el contrario, el cemento asfáltico presenta altas viscosidades a bajas temperaturas de servicio se presentará fisuramiento. Lo anterior va unido a los cambios en el sistema coloidal que se puedan haber presentado durante la elaboración de la mezcla en planta.

La susceptibilidad térmica de un cemento asfáltico se utiliza principalmente en los siguientes casos:

- “Determinación de las temperaturas de mezclado y compactación
- Calibración de las temperaturas de manejo en planta y en servicio”¹⁹

Figura 4. **Curva de susceptibilidad térmica de cementos asfálticos**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 139.

Es característica del cemento asfáltico que su viscosidad disminuya rápidamente al crecer la temperatura. La relación viscosidad-temperatura es el factor que gobierna la aplicación en caliente del cemento asfáltico, y es evidente la importancia de determinar la temperatura necesaria para reducir su viscosidad al valor requerido para una operación dada.

La temperatura de aplicación de un material bituminoso es muy importante tanto en el diseño de las mezclas como en las etapas de fabricación y colocación en obra. El grado de recubrimiento de los agregados se ve altamente influenciado por la viscosidad del ligante y esta, a su vez, por la temperatura. Por lo tanto, es

¹⁹ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 138 - 139.

necesario contar con una viscosidad óptima del cemento asfáltico para el mezclado, ya que si esta es muy alta no se podrá obtener un óptimo recubrimiento y es muy baja es muy posible que se presente durante el transporte de la mezcla escurrimiento del ligante asfáltico con la pérdida de cobertura.²⁰

1.7. Clasificación de los asfaltos

A veces hay confusión acerca del origen del asfalto, de cómo es refinado, y como se clasifica en sus diferentes grados. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos. Existe una confusión similar respecto a ciertos términos relacionados con las propiedades del asfalto.²¹

El asfalto se presenta en una extensa variedad de tipos y grados normalizados, los cuales se utilizan con base en las especificaciones y necesidades que se presenten en campo. A continuación, se discutirán las características y los orígenes de los diferentes tipos de asfalto.

1.7.1. Cementos asfálticos

El cemento asfáltico es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo.

Este ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías debido principalmente a que es un material altamente cementante, termoplástico, repelente al agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, que posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, buena

²⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 139 – 140.

²¹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 11.

adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento), por lo que:

- Proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños.
- Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra penetración del agua proveniente de las precipitaciones.

El cemento asfáltico es comúnmente usado en la construcción de pavimentos para carreteras, autopistas, calles, aeropuertos, áreas de estacionamiento, entre otros. Para ello se mezcla con agregados (mezclas en caliente), obteniéndose los denominados concretos asfálticos para pavimentación.

Es utilizado también en la industria impermeabilizante y pintura asfáltica, revestimiento de diques, canales y materia prima para las emulsiones asfálticas. El cemento asfáltico a temperatura ambiente es semisólido y altamente viscoso, por lo que se requiere licuarlo temporalmente por calentamiento, para su manejo durante las operaciones de construcción, tales como bombeo por tubería, transporte de cisternas, mezcla con agregado, entre otras.²²

²² Elemento asfáltico. *El cemento asfáltico*. <http://elcementoasfaltico.blogspot.com/>. Consulta: 10 de junio de 2020.

1.7.1.1. Caracterización por penetración

En la tabla II se pueden observar las especificaciones ASTM D 946, basadas en cinco grados de penetración: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. El asfalto más blando es de grado 200-300, muy utilizado en Canadá. “Los cementos asfálticos de consistencia intermedia, grados 85-100 y 60-70, son los más comunes entre los ingenieros constructores colombianos”.²³

Tabla II. Especificación según el grado de penetración (ASTM D 946)

CARACTERISTICA	GRADO DE PENETRACION									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25 ° C, 100 g, 5 s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de llama, ° F (copa Cleveland)	450		450		450		425		350	
Ductilidad a 25 ° C, 5 cm/min, cm	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloroetileno, %	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Penetración retenida después del ensayo TOF, %	55		52		47		42		37	
Ductilidad a 25 ° C a 5 cm/min, después del ensayo TOF, cm	-	-	50		75		100		100	

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 204.

Esta clasificación ha tenido las siguientes ventajas:

- La clasificación en grados de penetración se basa en el ensayo de penetración a una temperatura media de servicio del pavimento. A esa

²³ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 204.

temperatura se pueden obtener mejores correlaciones con otras propiedades del cemento asfáltico a bajas temperaturas.

- El tiempo de ensayo es relativamente corto.
- Se puede adaptar fácilmente a las condiciones de campo, como indicador de una posible contaminación durante el transporte.
- El costo del equipo utilizado para el ensayo es relativamente bajo.
- Los límites de precisión del ensayo están muy bien establecidos.
- Es un ensayo que permite obtener la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico.

Por otra parte, esta clasificación tiene las siguientes desventajas:

- Es un ensayo que mide la consistencia del asfalto utilizando magnitudes no fundamentales.
- El esfuerzo cortante aplicado durante el ensayo es alto.
- El esfuerzo cortante varía durante el ensayo dependiendo del tipo de flujo de cada cemento asfáltico.
- La similitud en la penetración a 25 °C puede llevar a emitir afirmaciones erróneas sobre el comportamiento tanto a bajas como a altas temperaturas de servicio (ver figura 4).
- “El valor de la viscosidad no se puede establecer para conocer las temperaturas óptimas durante los procesos de mezclado y compactación”.²⁴

1.7.1.2. Caracterización por viscosidad

Este sistema basado en la viscosidad del cemento asfáltico original es el más utilizado en los Estados Unidos para la clasificación de estos ligantes bituminosos. En las tablas III a V se muestran los requerimientos exigidos a los cementos

²⁴ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 204 - 206.

asfálticos para clasificarlos en alguno de los grados de viscosidad a 60 °C especificados por la norma ASTM D 3381.²⁵

Tabla III. **Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C**

Nota: graduación basada en el asfalto original					
Ensayo	Grado de viscosidad				
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad a 60°C, Poises	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	4000 ± 800
Viscosidad a 135°C, centistokes, min	80	110	150	210	300
Penetración a 25°C, 100 g, 5 seg. 1/10 cm, min	200	120	70	40	20
Punto de inflamación °C (Copa abierta de Cleveland), min	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, %, min	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Ensayos al residuo de película fina:					
Viscosidad a 60°C, Poises, Max	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm, min	100*	100*	50	20	10

* Si la ductilidad es menor de 100, el material se aceptará si la ductilidad a 15.5°C es mínimo 100 a la velocidad de 5 cm/min

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 206.

En las tablas III y IV se muestran los siguientes grados de cemento asfáltico basados en su viscosidad a 60 °C: AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-30 y AC-40. La tabla V muestra el sistema de clasificación basado en la viscosidad del asfalto envejecido a través del ensayo RTOF. La especificación AASHTO M 226 se basa también en la viscosidad y es muy similar a la norma ASTM D 3381.²⁶

²⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 206.

²⁶ *Ibíd.* p. 206 - 207.

Tabla IV. **Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C**

Nota: graduación basada en el asfalto original					
Ensayo	Grado de viscosidad				
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad a 60°C, Poises	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	4000 ± 800
Viscosidad a 135°C, centistokes, min	125	175	250	300	400
Penetración a 25°C, 100 g, 5 seg. 1/10 cm, min	200	140	80	60	40
Punto de inflamación °C (Copa abierta de Cleveland), min	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, %, min	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Ensayos al residuo de película fina:					
Viscosidad a 60°C, Poises, Max	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm, min	100*	100*	75	50	25

* Si la ductilidad es menor de 100, el material se aceptará si la ductilidad a 15.5°C es mínimo 100 a la velocidad de 5 cm/min

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 207.

La unidad utilizada para medir la viscosidad es el Poise. Un cemento asfáltico de grado AC-2.5 representa un ligante con una viscosidad de 250 poises a 60 °C y es más blando que uno de grado AC-40, el cual es un cemento asfáltico con una viscosidad de 4.000 poises a la misma temperatura.

Otros requerimientos de la especificación son la penetración, la viscosidad a 135 °C a 60 °C, la ductilidad del residuo del ensayo al horno en película fina (TOF) y el punto de llama.

La penetración sirve para regular la consistencia del cemento asfáltico a temperaturas medias de servicio, mientras que la viscosidad a 135 °C a 60 °C

controla la consistencia a una temperatura cercana a la de mezclado y compactación. Todos estos requerimientos controlan la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico.²⁷

Tabla V. **Requerimientos para cementos asfálticos según el grado de viscosidad a 60°C**

Ensayos	Grado de viscosidad				
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000
Nota: graduación basada en el residuo de película fina rotativa (RTFO)*					
Viscosidad a 60°C, Poises	1000 ± 250	2000 ± 500	4000 ± 1000	8000 ± 2000	16000 ± 4000
Viscosidad a 135°C, centistokes, min	140	200	275	400	550
Penetración a 25°C, 100 g, 5 seg. 1/10 cm, min	63	40	25	20	20
Porcentaje (%) de penetración respecto al original a 25°C, min	...	40	45	50	52
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm, min	100**	100**	75	75	75
Ensayos al asfalto original:					
Punto de inflamación °C (Copa abierta de Cleveland), min	205	219	227	232	238
Solubilidad en tricloroetileno, %, min	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
* Se puede usar el ensayo de película delgada, pero el ensayo de película fina rotativa debe ser el de referencia					
** Si la ductilidad es menor de 100, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5°C es mínimo 100 a la velocidad de 5 cm/min					

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 208.

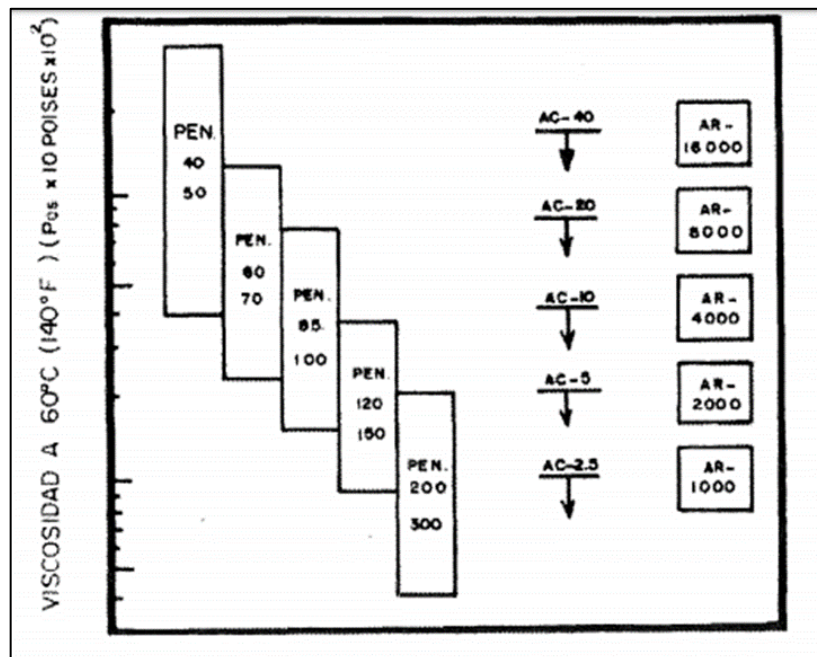
La diferencia primordial entre las especificaciones dadas en la tabla III y IV (contenidas en la norma ASTM D 3381) consiste en que los cementos asfálticos especificados en la tabla IV tienen menor susceptibilidad térmica. Los valores mínimos de penetración a 25 °C y viscosidad a 135 °C especificados para los grados de viscosidad de la tabla IV son más altos que las especificaciones dadas en la tabla III.

²⁷ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 207.

El sistema de clasificación utilizando los grados de viscosidad presenta las siguientes ventajas:

- La viscosidad es una propiedad fundamental, algo independiente del tamaño de la muestra y del sistema de ensayo.
- Es aplicable a un amplio rango de temperaturas del pavimento (25 °C a 60 °C).
- Se basa en la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que se puede presentar en la época de verano, en la superficie del pavimento.
- Hay una mínima superposición con otros sistemas de medida (figura 5).
- Para su determinación, se pueden utilizar una amplia gama de equipos.
- La susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos se puede estudiar fácilmente.
- Los límites de precisión del ensayo están bien establecidos.²⁸

Figura 5. **Comparación de la clasificación por grado de penetración y grado de viscosidad**



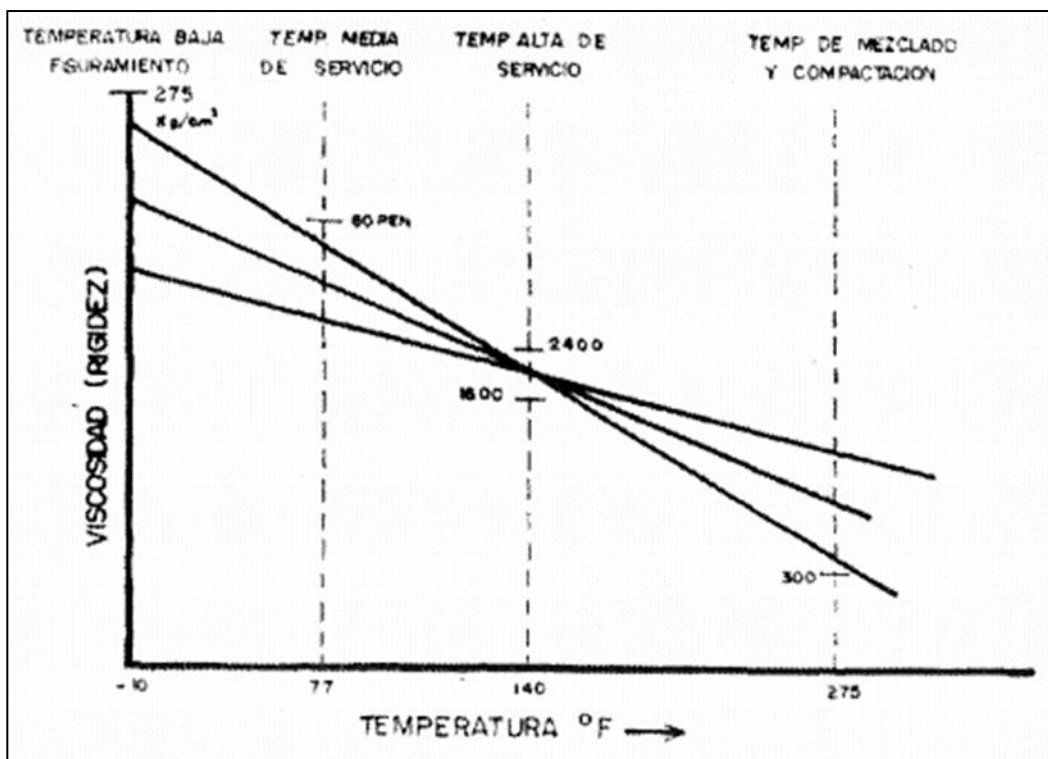
Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 210.

²⁸ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 208 – 209.

Entre las desventajas de este sistema de clasificación se tienen:

- El sistema de ensayo es ligeramente más costoso que el del penetrómetro.
- Es difícil predecir el comportamiento a las temperaturas de servicio baja y media (figura 6).
- No es adecuado para controlar el fisuramiento a bajas temperaturas de servicio.
- El tiempo de ensayo es relativamente largo.
- La viscosidad del residuo del ensayo TOF puede variar considerablemente para cementos asfálticos del mismo grado.²⁹

Figura 6. **Susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos, según el grado de viscosidad**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 209.

²⁹ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 209 - 210

1.7.1.3. Caracterización por comportamiento

Para la caracterización del cemento asfáltico mediante su grado de comportamiento se aplica la norma ASTM D6373 (Especificación Estándar por Grado de Comportamiento), la cual fue elaborada por el Instituto del Asfalto en Estados Unidos y propuesta para su implementación en el SHRP (Strategic Highway Research Program), en dicha norma se incluye el conocimiento de las temperaturas máximas y mínimas del cemento asfáltico con base en la temperatura del aire y latitud geográfica. Con la aplicación de este sistema se puede llegar a predecir el comportamiento del asfalto a corto y largo plazo.

1.7.2. Asfaltos rebajados

La forma más frecuente de fluidificar un cemento asfáltico para manejarlo durante los procesos de bombeo, mezclado y colocación en obra, es calentándolo a una temperatura alrededor de 135 °C. Existen otros métodos, como su dilución mediante solventes del petróleo previamente seleccionado, obteniendo los asfaltos líquidos o *cut-back*, también denominados asfaltos rebajados o fluidificados.

El uso de este tipo de ligantes bituminosos se ha restringido (...) debido a los altos costos de los solventes y por el alto grado de contaminación ambiental. El principio de aplicación de estos ligantes consiste en que, una vez colocados, los solventes inician el proceso de volatilización dejando al cemento asfáltico en condiciones óptimas para el cumplimiento de su objetivo.³⁰

1.7.2.1. Asfalto fluidificado

Según el Instituto Norteamericano del Asfalto, el asfalto líquido se define como: “material asfáltico cuya consistencia blanda o fluida hacer que se salga

³⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 231.

del campo en que se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300”³¹.

Están compuestos por una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil, de naturaleza compatible con la del cemento asfáltico con el fin de evitar la precipitación de asfaltenos. Lo ideal es utilizar solventes que procedan del mismo crudo asfáltico. El fluidificante que puede ser bencina, kerosene o aceite, se adiciona para proporcionar al cemento asfáltico la viscosidad necesaria para poderlo mezclar con los agregados pétreos a temperaturas bajas (alrededor de 70 °C).

Una vez aplicados, los solventes o fluidificantes se evaporan (proceso de curado) en un tiempo más o menos largo dependiendo de su naturaleza, quedando como residuo el cemento asfáltico, el cual envuelve y proporciona cohesión a las partículas de agregado.

De acuerdo con el mayor o menor grado de volatilización del fluidificante, se pueden fabricar tres tipos de asfalto líquido:

- “Los asfaltos líquidos de curado rápido RC
- Los asfaltos líquidos de curado medio MC
- Los asfaltos líquidos de curado lento SC”³²

1.7.2.2. Asfalto de curado rápido

El fluidificante utilizado para su fabricación es la bencina o nafta, que tiene como característica la de ser un diluyente liviano de alta volatilidad y un punto de ebullición bajo. Se designa con las letras RC (rapid curing) seguidas por un

³¹ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 231.

³² *Ibíd.* p. 231 - 232.

número que indica su grado de viscosidad en centistokes. De acuerdo con esto, se pueden obtener los siguientes asfaltos RC.³³

Tabla VI. **Grados de viscosidad en asfaltos de curado rápido**

GRADO	RESIDUO ASFÁLTICO EN VOLUMEN
RC-70	55 %
RC-250	65 %
RC-800	75 %
RC-3,000	80 %

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 232.

1.7.2.3. **Asfalto de curado medio**

Su fluidificante es un diluyente de grado de volatilidad media y punto de ebullición del kerosene. Se designa con las letras MC (medium curing) seguidas por un número que indica su grado de viscosidad en centistokes. Los asfaltos MC son los siguientes.³⁴

Tabla VII. **Grados de viscosidad en asfaltos de curado medio**

GRADO	RESIDUO ASFÁLTICO EN VOLUMEN
MC-30	50 %
MC-70	55 %
MC-250	67 %
MC-800	75 %
MC-3,000	80 %

Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 233.

³³ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 232.

³⁴ *Ibíd.* p. 233.

1.7.2.4. Asfalto de curado lento

Su fluidificante es un aceite, relativamente poco volátil. Se designa con las letras SC (*slow curing*) seguidas por un número que indica su grado de viscosidad en centistokes. Los SC más utilizados fueron los SC-70 y SC-250.³⁵

El uso de los asfaltos de curado lento ha disminuido considerablemente a nivel mundial, esto debido a que son altamente contaminantes y el precio de los solventes es elevado y, además, como en su nombre se indica, estos fraguan muy lentamente y se emplean únicamente cuando se desea una consistencia aproximada a la del ligante antes y después del periodo de curado.

1.7.3. Asfalto emulsificado

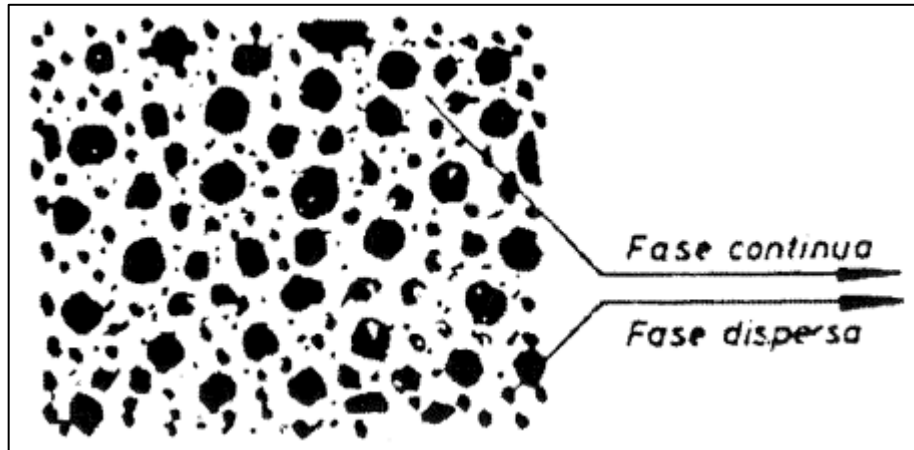
Una emulsión es una dispersión fina de cierto grado de estabilidad de un líquido en otro, no miscibles entre sí. En la naturaleza hay numerosos ejemplos de emulsiones, como el látex natural, algunos aceites vegetales, entre otros.

“En la emulsión que se utiliza en la tecnología en frío se pueden distinguir dos fases: una discontinua conformada por las gotitas esféricas de cemento asfáltico y una continua conformada por el medio en el cual se dispersan”.³⁶

³⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 233.

³⁶ *Ibíd.* p. 254.

Figura 7. Fases de una emulsión asfáltica



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 254.

El diámetro de los glóbulos de asfalto en una emulsión asfáltica o bituminosa está comprendido entre 3 y 8 micras, lo que hace incrementar la superficie específica del cemento asfáltico, favoreciendo el mojado, distribución y cohesión con las partículas de agregado.

El cemento asfáltico es por naturaleza hidrófobo, lo cual provoca la unión entre glóbulos dando lugar a otros de tamaño mayor, provocando la separación del cemento asfáltico y del agua. Para evitar la coalescencia de los glóbulos de cemento asfáltico se adiciona un agente estabilizador denominado emulgente o emulsificante.³⁷

1.7.3.1. Emulsión aniónica

En las emulsiones aniónicas las partículas de asfalto se cargan negativamente presentando afinidad por los cuerpos con carga positiva. Los emulsionantes que permiten esta polaridad son generalmente oléalos o resíalos de sosa o de potasa, u otros jabones similares. El estearato sódico es

³⁷ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 255.

muy usado con este fin: en agua, se ioniza dando un anión soluble en betún de manera que cada glóbulo de betún se rodea de una película de iones de estearato cargados negativamente, con lo cual los glóbulos tienden a repelerse evitándose la coagulación.

“La cantidad de emulsionante depende de la estabilidad que se desee en la emulsión, aunque como máximo está en un 2 % del peso de la emulsión”.³⁸

1.7.3.2. Emulsión catiónica

En las emulsiones catiónicas las partículas de asfalto se cargan positivamente presentando por tanto afinidad por los cuerpos de carga negativa. Los emulsionantes que las producen son sales cuaternarias de amonio como el bromuro de *cetil trimetril amonio*, el cual forma un anión de bromo y un catión que es el radical *cetil trimetril amonio* cargado positivamente que rodea a las partículas de betún y se adhiere con gran facilidad a los áridos que presentan carga débil negativa.

Esta carga atrae a las partículas de betún generando en parte la rotura de la emulsión que continúa su rotura por evaporación del agua.

“La proporción de emulsionante va del 2 % al 3 % en peso de emulsión, en función de la estabilidad que se desee conferir al sistema”.³⁹

³⁸ Construmatica. *Emulsiones Bituminosas*.
https://www.construmatica.com/construpedia/Emulsiones_Bituminosas. Consulta: 16 de junio de 2020.

³⁹ *Ibíd.*

1.7.3.3. Clasificación según la velocidad de rotura

El término rotura hace referencia al momento en que ocurre la separación del agua y el asfalto, siendo este un factor decisivo en la selección del tipo de emulsión a utilizar en una obra específica. De acuerdo con la velocidad de rotura, se pueden clasificar en cuatro grupos:

- “Emulsiones asfálticas de rotura lenta (RL)
- Emulsiones asfálticas de rotura media (RM)
- Emulsiones asfálticas de rotura rápida (RR)
- Emulsiones asfálticas superestables (SS)⁴⁰

1.7.3.4. Composición de las emulsiones asfálticas

Los componentes básicos de una emulsión asfáltica son:

- El cemento asfáltico

Es el principal componente de la emulsión, constituyendo entre un 55 % y un 70 % de la misma. Es un cemento asfáltico que cumple con las características físicoquímicas y reológicas exigidas para obtener una buena emulsificación. En la práctica se recomienda que el ligante presente las siguientes características:

- Estado coloidal: tipo sol y sol-gel
- Contenido de asfaltenos: 18 % - 26 %
- Contenido de resinas: 30 % - 42 %
- Contenido de aceites: 44 % - 50 %.
- Contenido de resinas cálcicas cíclicas aromáticas: 15 % del contenido de resinas.
- Contenido de parafinas: bajo.
- Contenido de ácidos nafténicos: alto (índice de acidez mayor de 1,0).
- Índice de penetración: entre -1 y +1.
- Bajo contenido de sal.⁴¹

⁴⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 260.

⁴¹ *Ibíd.* p. 256.

- El agua

“De gran importancia en la fabricación de la emulsión. Se debe controlar la presencia de calcio y magnesio pues afectan sus propiedades químicas.”⁴²

- El emulsificante

Aunque cuantitativamente es menor que el cemento asfáltico, se considera como el elemento esencial para su producción. Tiene como función principal estabilizar y evitar la coalescencia de la emulsión (unión de los glóbulos de cemento asfáltico). El emulsificante permite el rompimiento oportuno y cambia la tensión superficial en el área de contacto con el agregado.

Pueden ser de tipo aniónico o catiónico, según en su carga eléctrica se desplace al ánodo o al cátodo. Su molécula consta de una parte muy afín con el cemento asfáltico que queda firmemente anclada en él, y de otra parte cargada iónicamente, dando lugar a la formación de micela de asfalto con sus cargas eléctricas alrededor, generando fuerzas repulsivas, responsables de la estabilidad de la emulsión.⁴³

- Los aditivos

Muchas veces los emulsificantes vienen acompañados por aditivos con el fin de mejorar alguna característica específica de la emulsión (viscosidad, adherencia, tiempo de rotura, entre otras). Su naturaleza química son los clorhidratos de aminas y, generalmente, están constituidos por clorhidratos de poliaminas grasas o de mezclas de poliamina y diamina. Es necesario, antes de utilizarlos, conocer la afinidad emulgente y aditivo con el fin de evitar un deterioro irreversible en la calidad de la emulsión.⁴⁴

⁴² ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 256.

⁴³ *Ibíd.* p. 256 – 257.

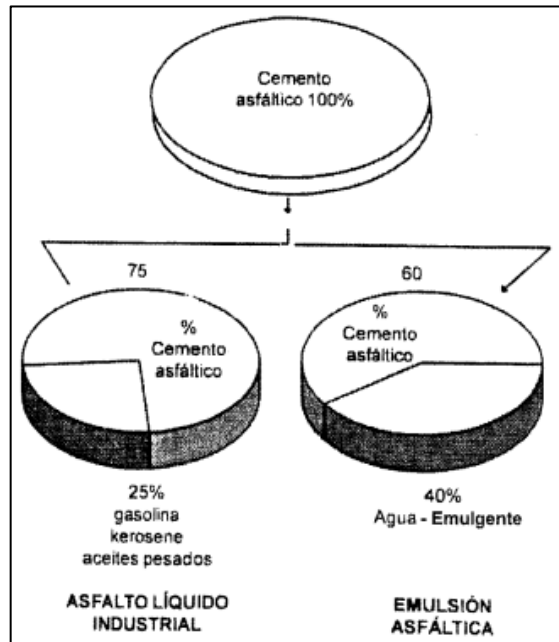
⁴⁴ *Ibíd.* p. 258.

2. COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

2.1. Cemento asfáltico

Los cementos asfálticos o asfaltos de penetración se designan por lo general con las letras AC y provienen de la refinación del petróleo o de la mezcla de un asfalto refinado y un aceite fluidificante (gasóleo). Se les considera como un material ideal para los trabajos de pavimentación, pues además de sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, poseen características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, sales y alcoholes. Son utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, ya que se necesitan altas temperaturas para disminuir su consistencia de tal manera que permitan envolver bien las partículas.⁴⁵

Figura 8. **Materiales asfálticos para pavimentación**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 79.

⁴⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. pp. 79 – 80.

2.1.1. Origen de los asfaltos

Se denomina asfalto a determinadas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción. Estos últimos representan más del 90 % de la producción total de asfaltos.⁴⁶

2.1.1.1. Asfaltos naturales

Procesos análogos que ocurren en la naturaleza han formado depósitos naturales de asfalto, algunos prácticamente libres de materias extrañas y otros en que el asfalto se encuentra mezclado con cantidades variables de ciertos minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o rocas asfálticas. Estos asfaltos naturales se manifiestan en diversas formas, entre las que se destacan las siguientes:⁴⁷

2.1.1.1.1. Manantiales

Se presentan en algunas fuentes de las que fluye petróleo o asfalto líquido, generalmente en pequeña cantidad. Proviene comúnmente de depósitos de cierta importancia, con salida al exterior por alguna grieta de la roca.⁴⁸

2.1.1.1.2. Lagos

A veces, manantiales como los descritos anteriormente, pero de un gran caudal, situados en el fondo de depresiones profundas, pueden dar lugar a la formación de lagos de asfalto, como el muy conocido de Trinidad, cerca de las costas de Venezuela, el cual es uno de los mayores yacimientos de asfalto natural en el mundo. El material en su estado natural, es una emulsión de asfalto, gases, agua, arena y arcilla; para su mejor aprovechamiento se somete a sencillos procesos de refinación que le eliminan las sustancias perjudiciales.⁴⁹

⁴⁶ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 85.

⁴⁷ *Ibíd.*

⁴⁸ *Ibíd.*

⁴⁹ *Ibíd.* p. 86.

2.1.1.1.3. Exudaciones

“Se presentan en rocas porosas saturadas de asfalto, de las que este fluye bajo los efectos del calor o de alguna presión interior.”⁵⁰

2.1.1.1.4. Impregnando rocas

Son bastante frecuentes los yacimientos de rocas más o menos porosas en las que el asfalto se encuentra llenando parcial o totalmente los poros, pero sin llegar a exudar. La proporción de asfalto contenido en estas rocas puede variar dentro de los límites amplios siendo de mayor utilidad aquellas cuya proporción de asfalto es mayor del 7 %.⁵¹

2.1.1.1.5. Filones

Son intrusiones de asfalto en una masa rocosa, a través de grietas o fallas en algunos de sus estratos, o bien, la sedimentación alternada de capas de asfalto y otros materiales. El primer origen generalmente da lugar a filones inclinados o verticales y el segundo a filones horizontales. Es el caso de la llamada *gilsonita* que se encuentra en algunas regiones de los Estados Unidos formando filones verticales que se explotan a cielo abierto.

Son famosos los filones de asfalto que se encuentran en el lecho del mar muerto. El asfalto contenido en ellos se denomina *asfaltites*, caracterizándose por su elevado punto de fusión; cuando se desprende alguna cantidad de asfalto de estos filones, por efectos de terremotos u otras sacudidas, los trozos de asfalto, por su menor densidad, flotan en la superficie, donde pueden recogerse.

⁵⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 86.

⁵¹ *Ibíd.*

“Este asfalto no se explota industrialmente, ya que las cantidades que pueden obtenerse son muy pequeñas. Representa un gran valor histórico ya que fue una de las primeras fuentes de suministro de asfalto en la antigüedad”.⁵²

2.1.1.2. Derivados del petróleo

Casi todo el asfalto que se produce y utiliza actualmente en el mundo procede de la refinación del petróleo. El asfalto derivado del petróleo es llamado a veces asfalto residual (residuo de la destilación del petróleo) para distinguirlo de los asfaltos naturales. Las implicaciones poco deseables que normalmente se atribuye a la palabra residual han conducido a la industria del asfalto a preferir el empleo de la expresión de destilación directa que, sin embargo, es actualmente inexacta, ya que raramente se producen asfaltos del petróleo por destilación simple sin algún tratamiento posterior.⁵³

2.1.1.2.1. Refinación del petróleo

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. (...).

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. (...), el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480 °C (900 °F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.⁵⁴

2.1.1.2.2. Refinación del asfalto

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente,

⁵² ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 86 – 87.

⁵³ *Ibíd.* p. 87.

⁵⁴ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 11.

mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

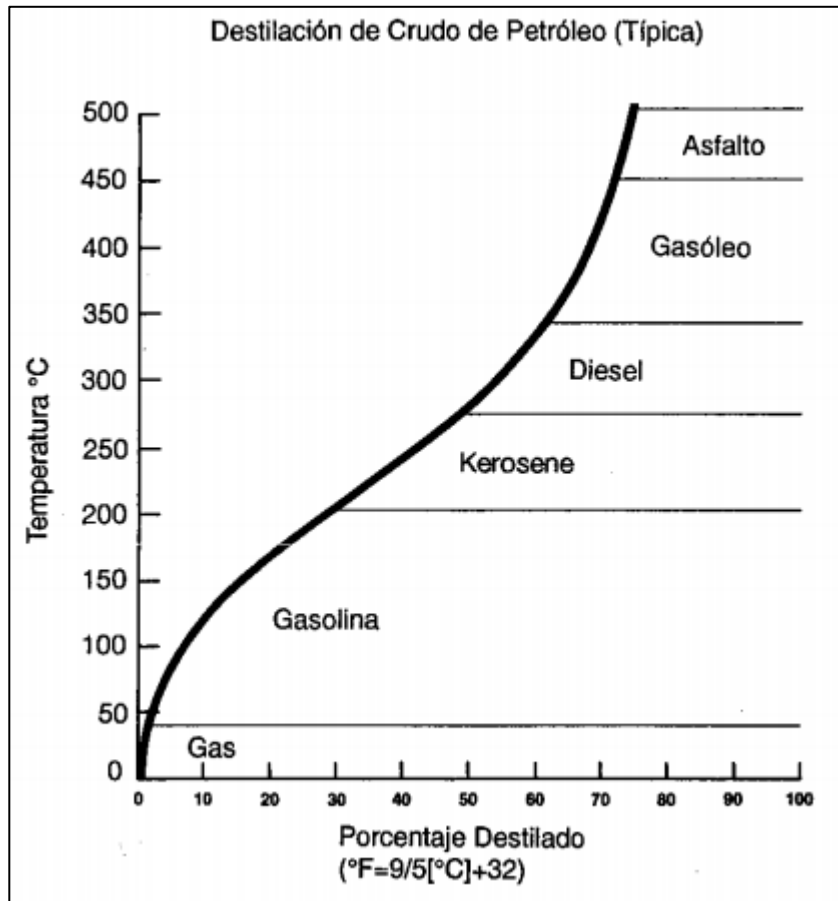
Existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.⁵⁵

⁵⁵ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 11 - 12.

Figura 9. **Productos y temperaturas típicas de destilación**



Fuente: Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 12.

2.1.2. **Composición del asfalto**

Existe infinidad de libros que tratan de explicar la composición química del cemento asfáltico. El tema ha resultado muy controvertido debido principalmente a que este material está conformado por una mezcla muy compleja de compuestos orgánicos de alto peso molecular.

Es necesario tener un amplio conocimiento de la constitución química de los asfaltos, ya que brinda una gran ayuda para poder controlar las propiedades químicas y físicas de los mismos, lo cual permite adecuarlo a la función que va a desarrollar en la vía.

Al igual que el petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, mezclados en proporciones muy diferentes.

La mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo, pero el proceso de refinación da también lugar a cambios en su estructura molecular. Como los hidrocarburos livianos se eliminan durante ese proceso, la gran mayoría de los hidrocarburos son pesados y de molécula complicada.

Los hidrocarburos constituyentes de los asfaltos pueden pertenecer a uno o varios de los siguientes grupos:

- Alifáticos saturados o parafínicos
- Nafténicos o cicloparafínicos
- Aromáticos
- Alifáticos no saturados

Además del carbono e hidrógeno, constituyentes principales de los hidrocarburos, se encuentran presentes: azufre, nitrógeno, vanadio, níquel, entre otros. Estos minerales desempeñan un papel muy importante dentro del comportamiento del asfalto.⁵⁶

La química del asfalto es, muy seguramente, la parte más compleja de la industria petrolera, porque se trata de una mezcla de diferentes tipos de materiales con diferentes pesos moleculares. La investigación en este sentido es también compleja, pues se trata de correlacionar la composición química con las propiedades físicas y su comportamiento en servicio.⁵⁷

⁵⁶ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 87 - 88.

⁵⁷ *Ibíd.* p. 88 - 89.

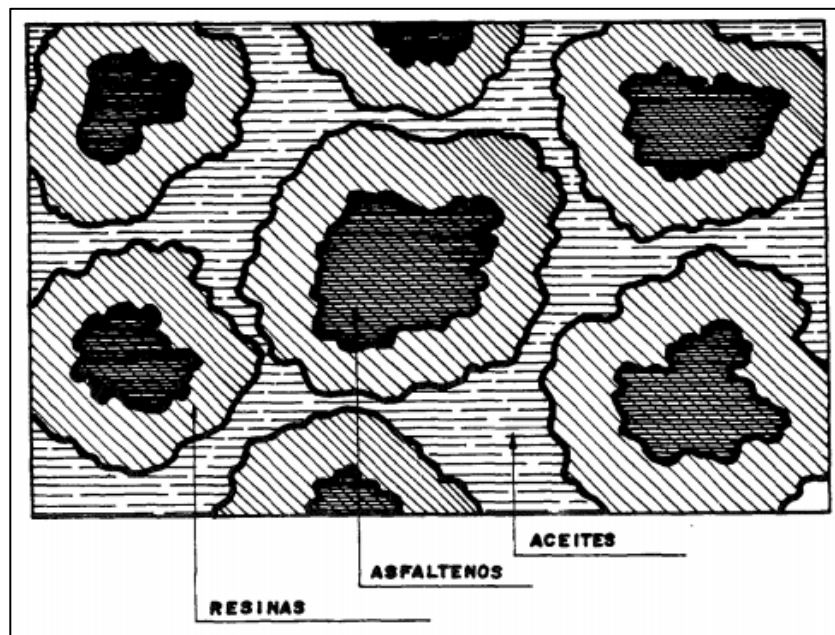
2.1.2.1. Estructura coloidal

Una disolución consiste en un disolvente y un soluto. El soluto está disperso en el disolvente molecularmente, o sea que la sustancia está dividida completamente en moléculas.

Hay casos en que un cuerpo puede presentarse disperso en otro, pero no en forma molecular, sino en grupos más o menos grandes de moléculas. Esta dispersión se llama solución coloidal si el tamaño de los grupos de moléculas no es tan grande que se produzca su separación por precipitación o por flotación. Los grupos de moléculas en suspensión coloidal se denominan micelas (fase dispersa), y el líquido en el que están suspendidas: líquido intermicelar (fase continua).

Los sistemas coloidales pueden ser de dos tipos: sistema coloidal sol y sistema coloidal gel.⁵⁸

Figura 10. Esquema coloidal de Pfeiffer



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 90.

⁵⁸ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 90 - 91.

En los sistemas tipo sol existe un equilibrio entre los componentes de la fase dispersa (micelas).

En los sistemas coloidales tipo gel existe unión entre las micelas, lo cual se traduce en que estas tomen posiciones fijas y por lo tanto hagan más rígido el sistema coloidal.

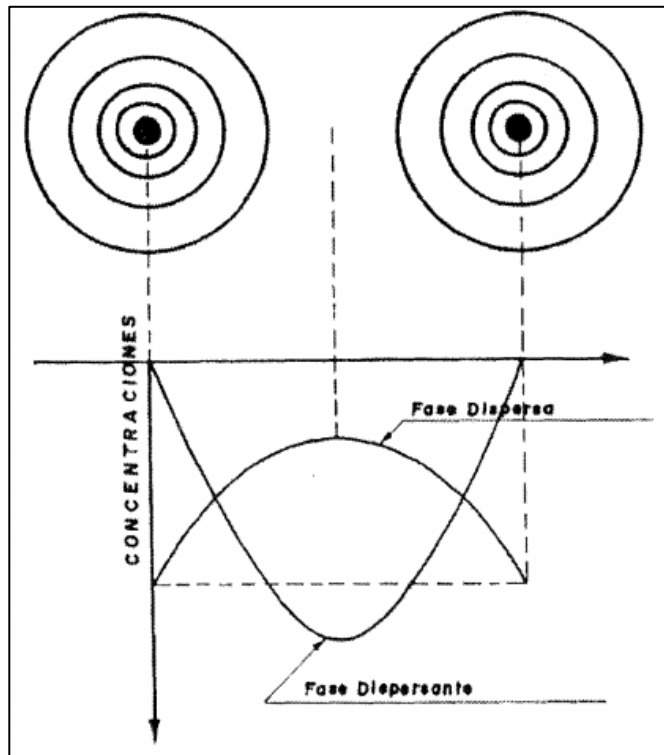
El asfalto también es una mezcla de gran número de hidrocarburos de diverso carácter que son solubles unos en otros en proporciones diversas. Las moléculas al agruparse según sus características físicas, dan lugar a una estructura coloidal característica. Las moléculas más pesadas se agrupan formando micelas o fase dispersa (en suspensión) mientras que las más ligeras constituyen el líquido intermicelar o la fase continua (medio de dispersión).

El petróleo es una mezcla de un sinnúmero de hidrocarburos, disueltos unos en otros, en la que probablemente se encuentran ya presentes partículas coloidales. Al eliminar por destilación los hidrocarburos más ligeros, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y van uniéndose por adsorción a las micelas ya existentes, aumentando su volumen a medida que se extrema la destilación.

Las partículas dispersas tienen un tamaño del orden de 10 a 1 000 Å (Armstrong $A = 10^{-8}$ cm). En la mayor parte de los casos no existe separación entre micela y líquido intermicelar, sino que podemos imaginar el centro de la micela como el punto de máxima concentración de fase dispersante.⁵⁹

⁵⁹ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 91.

Figura 11. **Concentración máxima de la fase dispersante**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 92.

El fenómeno anterior sería simple si solamente el asfalto tuviera dos cuerpos en presencia; lo que realmente ocurre es que encontramos una infinidad de ellos. Para simplificar este problema se ha clasificado a los componentes del asfalto en dos grupos, a saber: los asfaltenos, formando las micelas y los máltenos, característicos de la fase continua.⁶⁰

2.1.2.1.1. Los asfaltenos

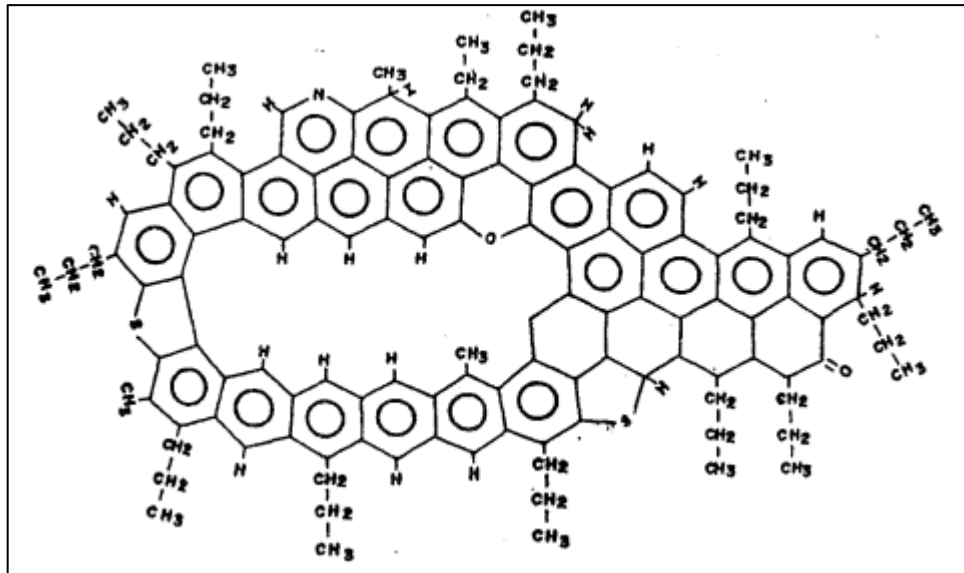
Se definen como los compuestos solubles que se precipitan del petróleo crudo por la adición de un mínimo de 40 volúmenes de N-Pentano. Son partículas sólidas, cuyo color va desde el café oscuro hasta el negro, sin punto

⁶⁰ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 91 - 92.

de fusión definido. Al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y aglutina, dejando un residuo de carbón. Son hidrocarburos de molécula de alto peso molecular (103 a 105 unidades de masa atómica), de carácter predominantemente aromático, y su razón C/H (número de átomos de carbono/número de átomos de hidrógeno) es aproximadamente 0,8 a 0,9. Su grado de aromaticidad aumenta con el valor de la relación C/H.

Diversos estudios analíticos muestran que los asfaltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares, rodeados de cadenas alquílicas con un peso molecular que varía de 1 000 a 4 000 unidades de masa atómica (UMA), con estructura plana, generalmente conocida como microestructura. Estas moléculas se agrupan en capas de cinco o seis para formar un cristal o partícula con un peso molecular que varía de 4 000 a 10 000 UMA. A su vez, varios de estos cristales se agrupan para formar las llamadas micelas con peso molecular que varía de 40 000 a 40 000 000 UMA, que contiene en su interior metales como el níquel y el vanadio. A estos agrupamientos se les conoce como macroestructura de los asfaltenos.⁶¹

Figura 12. Macroestructura de los asfaltenos



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 94.

⁶¹ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 92 - 93.

Los asfaltenos concentran los compuestos indeseables de los asfaltos, pues contienen los metales pesados y el azufre. Es importante anotar que por la deshidrogenación de los anillos en los crudos resultan los compuestos *clúster*, los cuales están formados por una serie de átomos en donde cada uno de ellos se encuentra enlazado, por lo menos, con otros dos átomos de la misma clase formando un poliedro o fragmento de poliedro.

El contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico varía generalmente entre un 15 % y un 20 %. Por lo general, el valor no dice nada del comportamiento en servicio, pero el crudo pesado y mediano genera un producto de mayor calidad que un crudo liviano.⁶²

2.1.2.1.2. Los maltenos

Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Se describe como un dispersante coloidal de partículas de asfaltina disueltas en un material parecido al aceite y muy pesado. Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y una muy poca cadena parafínica; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos. El mayor contenido del primero (maltenos) es lo que le da la calidad a un asfalto. Esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.

Los maltenos se separan por métodos físicos en resinas y aceites. Las resinas son más pesadas que los aceites, tienen un punto de ebullición más elevado y un carácter más aromático, presentan mayor poder de adsorción. Los maltenos también se pueden separar en diferentes fracciones con distintos puntos de ebullición.⁶³

⁶² ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 93.

⁶³ *Ibíd.* p. 93 - 94.

2.1.2.1.3. Las resinas y los aceites

Las resinas o aromáticos polares tienen un peso molecular de 1.100 UMA, con un mayor poder de adsorción y actúan como agente estabilizador de los asfaltenos.

Los aceites, a su vez, poseen un menor poder de adsorción. Son compuestos aromáticos de nafta y componentes saturados, con un peso molecular de 700 UMA. El nivel de compuestos saturados es importante en el asfalto, ya que las ceras o parafinas se consideran como componentes no deseables en él.

Un asfalto de buena calidad requiere que sus componentes químicos estén en una relación que garantice su estabilidad una vez se encuentre en servicio.

Si el asfalto es tratado con un hidrocarburo saturado de bajo punto de ebullición (por ejemplo: N-Pentano), se presentará un rompimiento de la estructura coloidal, disolviéndose una parte del material, mientras que el resto precipitará en forma de partículas grumosas de color oscuro.

Los cuerpos precipitados son los asfaltenos y los que quedan disueltos los maltenos. Filtrando la disolución obtenida anteriormente a través de un filtro de arcilla activada, se retienen las resinas quedando los aceites en disolución. De este proceso de descomposición se concluye que los asfaltenos son los principales componentes del núcleo de las micelas, los aceites predominan en el líquido intermicelar y las resinas constituyen una fase intermedia entre núcleo y líquido intermicelar.⁶⁴

⁶⁴ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 94 - 95.

2.1.3. Propiedades de los asfaltos

Antes que el intercambio de crudo, en el mercado, fuera algo corriente, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevó a que las fuentes de asfalto tuvieran, también, propiedades consistentes. Al integrarse el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas.

De estas variaciones salió la necesidad de poderse evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.⁶⁵

2.1.3.1. Propiedades reológicas y comportamiento en servicio

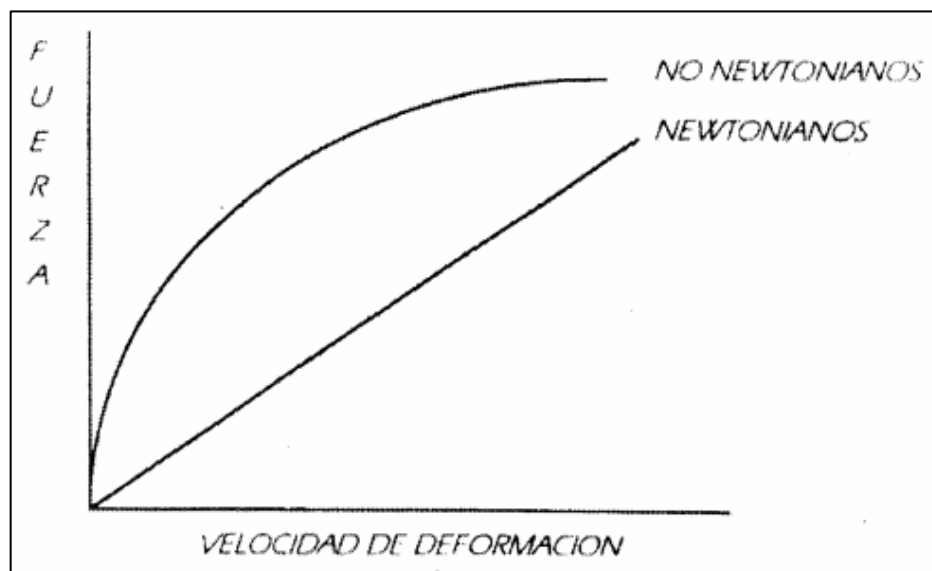
La reología es la rama de la mecánica que estudia el comportamiento de la materia a través del tiempo de aplicación de una carga, mediante el estudio de propiedades de flujo y deformación como la viscosidad, la ductilidad, la fragilidad, entre otras, permitiendo establecer una relación entre el estado coloidal de los cementos asfálticos y su composición química.

Cualquier material sometido a un esfuerzo cortante suficientemente grande es capaz de deformarse y fluir. Mientras la mecánica racional considera los cuerpos como elementos indeformables y la mecánica elástica los asimila a sólidos perfectamente elásticos, consecuente con la ley de Hooke, la reología trata el caso más general en que las deformaciones producidas por un agente exterior o por un proceso intrínseco aparecen íntimamente ligadas al factor tiempo.

⁶⁵ EcuRed. *Asfalto*. www.ecured.cu/Asfalto. Consulta: 27 de junio de 2020.

La estructura coloidal de los ligantes asfálticos hace bastante complicado el estudio de sus propiedades reológicas, que se dificulta aún más por su acentuado carácter termoplástico. Este carácter, es decir, su propiedad de ablandarse y hacerse deformable por efecto del calor, recuperando al enfriarse sus propiedades primitivas, ha hecho posible el empleo del cemento asfáltico como ligante desde la más remota antigüedad, pero es también lo que más complica el estudio de sus propiedades reológicas, pues todas deben estudiarse como funciones de la temperatura, representadas por curvas más o menos complicadas.⁶⁶

Figura 13. **Curva de flujo de un cemento asfáltico**



Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 130.

A los fluidos en los que existe una proporcionalidad entre la tensión cortante y la velocidad de deformación se les denomina Newtonianos o de flujo simple. El flujo de este tipo es conocido como flujo viscoso o flujo lineal y la gráfica obtenida se denomina curva de flujo o curva de consistencia. En los materiales Newtonianos, la viscosidad (μ) caracteriza completamente al fluido, ya que esta es independiente de la fuerza aplicada y de la velocidad de deformación.

⁶⁶ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 129.

Una propiedad característica de los cementos asfálticos de flujo newtoniano es que cuando la tensión cortante se multiplica por un factor A, la velocidad de deformación cortante se multiplica exactamente por el mismo factor.

No obstante, existen muchos materiales de interés técnico, llamados, en general, no Newtonianos, que por no ser verdaderos fluidos muestran viscosidades anómalas. Las leyes de deformación de dichos materiales son intermedias entre las aplicables a los líquidos newtonianos y a los sólidos.

Las curvas de consistencia de los mismos presentan formas mucho más complejas, apartándose de las rectas que caracterizan a los líquidos normales, lo cual significa que el valor de la viscosidad no es una constante, sino que varía con la intensidad de la fuerza aplicada o con la velocidad de deformación.⁶⁷

2.1.4. Ensayos para determinar las propiedades de los cementos asfálticos

El cemento asfáltico se presenta en una extensa variedad de tipos y grados normalizados. En esta sección se describen, en términos generales, los ensayos y pruebas que se realizan en laboratorio con el objetivo de determinar si los cementos asfálticos cumplen con las especificaciones normalizadas para los tipos y grados de asfaltos que se emplean en la construcción de pavimentos flexibles, y se hace referencia a las normas y métodos de dichos ensayos.

2.1.4.1. Penetración

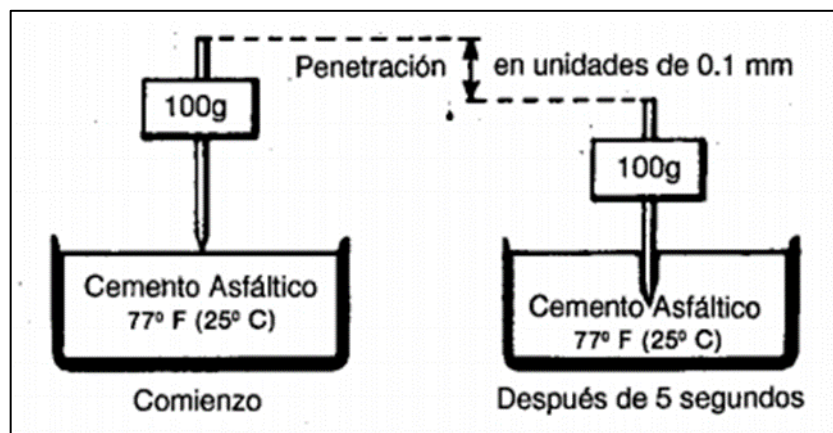
El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de

⁶⁷ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 129 - 130.

temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25 °C, que la aguja está cargada con 100 g y que la carga se aplica durante 5 s. La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. La unidad de penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuanto más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El Instituto del Asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el instituto tiene especificaciones para un betún asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el Método AASHTO T49 y en el ASTM D5.⁶⁸

Figura 14. Diagrama de la prueba de penetración



Fuente: Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 16.

⁶⁸ The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 38 - 39.

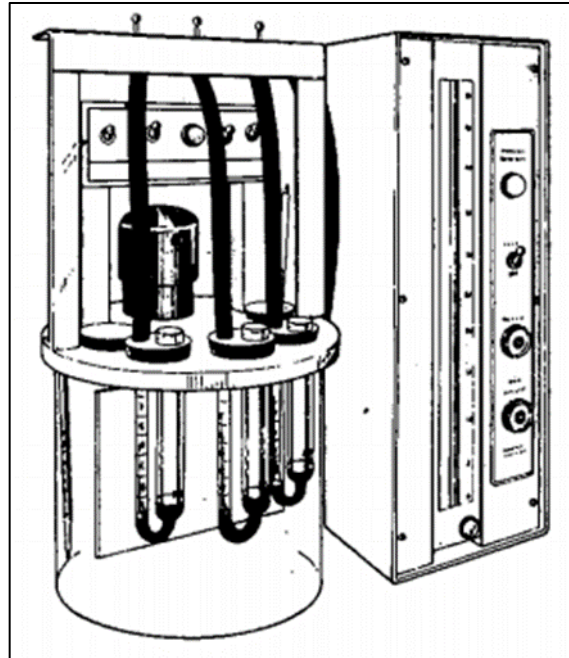
2.1.4.2. Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 °C (140 °F) y 135 °C (275 °F). La viscosidad a 60 °C (140 °F) es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Esta 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 (275 °F) corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. Conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado.

La prueba de viscosidad a 60 °C (140 °F) 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 (140 °F). Luego se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro, una muestra de cemento asfáltico calentada a la misma temperatura.⁶⁹

⁶⁹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 21.

Figura 15. **Viscosímetro de tubo capilar en un baño de temperatura constante**



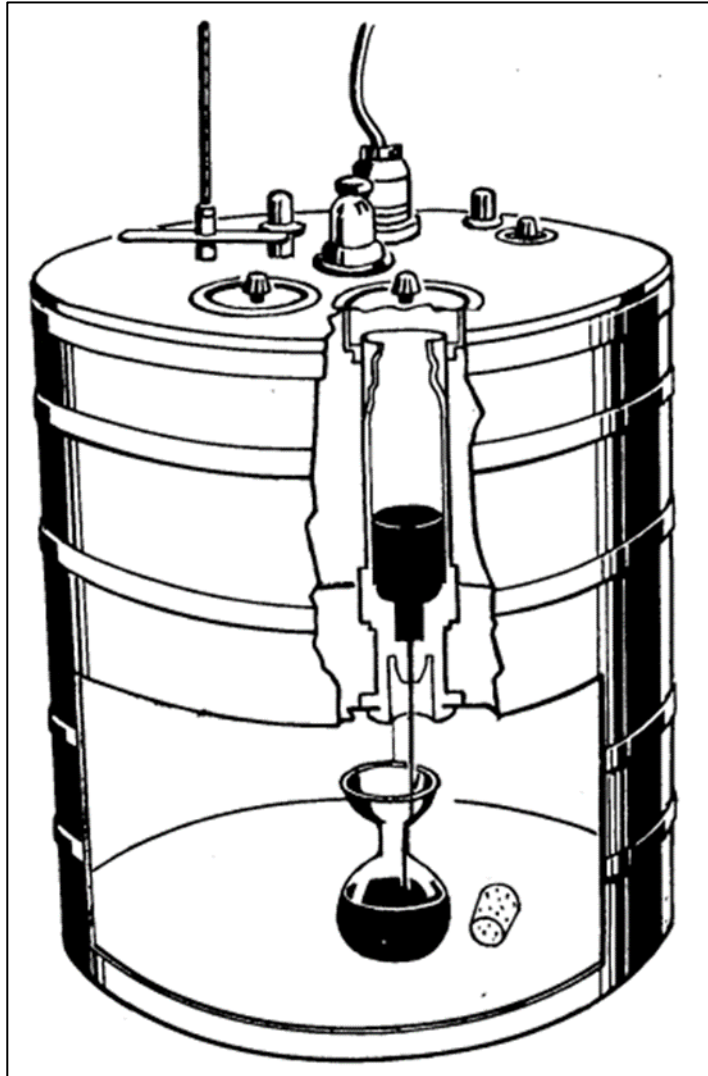
Fuente: Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 21.

En el ensayo Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad especificada de betún asfáltico. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100 °C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite.

Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material. Cuanto más viscosos son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimiento para la

realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E102.⁷⁰

Figura 16. **Determinación de la viscosidad Saybolt-Furol**



Fuente: The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 41.

⁷⁰ The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. p. 39 - 40.

2.1.4.3. 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, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

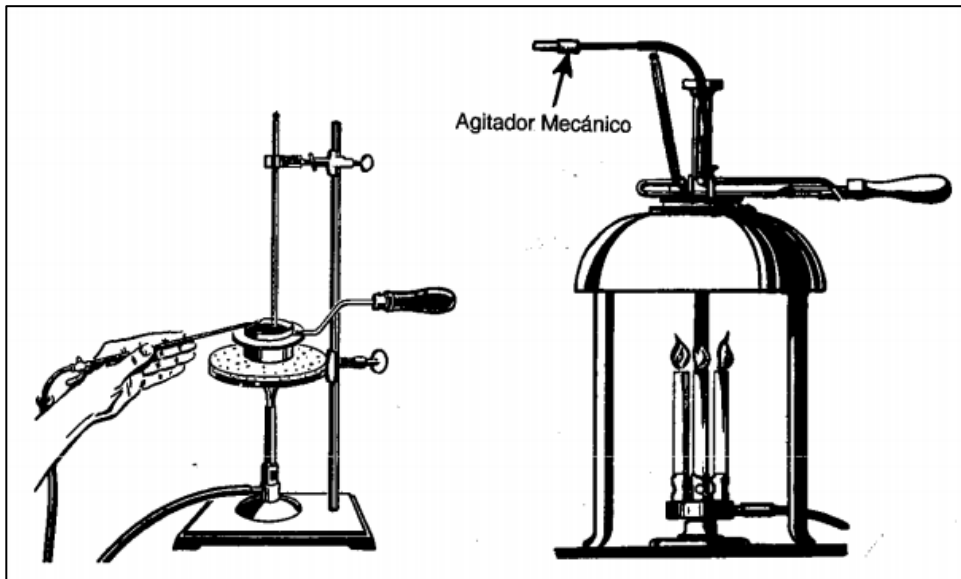
El punto de inflamación de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin 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 (figura 17). La temperatura a la cual se presentan destellos instantáneos de vapores sobre la superficie se denomina punto de inflamación. El ensayo de copa abierta de Cleveland es el procedimiento más comúnmente usado para determinar el punto de inflamación. Sin embargo, el ensayo de Pensky-Martens es a veces usado. Ambos sirven para el mismo propósito.⁷¹

La maquinaria y procedimiento para la realización del ensayo de copa abierta de Cleveland se encuentran descritos detalladamente en el método AASHTO T.18 y ASTM D 92. De la misma manera, el material y procedimiento de aplicación para el ensayo de Pensky-Martens se encuentran descritos en el método AASHTO T33 y ASTM D 93.

⁷¹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 23.

Figura 17. Pruebas de punto de inflamación: ensayo de copa abierta de Cleveland (izquierda); ensayo de Pensky-Martens (derecha)



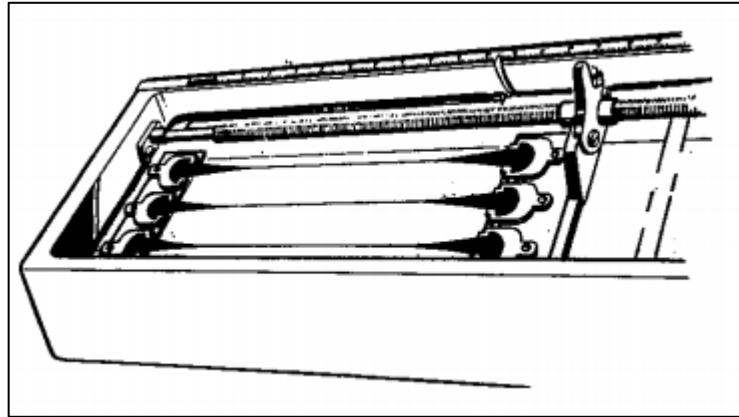
Fuente: Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 24.

2.1.4.4. Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuánto 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 una temperatura específicas (figura 18). 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 ductilidad de la muestra.⁷²

⁷² Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 24 - 26.

Figura 18. **Prueba de ductilidad**



Fuente: Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 24 - 26.

2.1.4.5. 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.⁷³

2.1.4.6. Peso específico

Se define como la relación entre la masa del material a una temperatura dada y la masa de igual volumen de agua a la misma temperatura. El peso específico cambia cuando el asfalto se expande por calentamiento.

⁷³ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 26.

La determinación del peso específico del cemento asfáltico a diversas temperaturas es de gran interés práctico por sus numerosas aplicaciones en las que es preciso emplear una cantidad determinada del material caliente, siendo más fácil medir volúmenes que pesos.

El peso específico del cemento asfáltico varía según su origen y proceso de obtención, manteniéndose siempre sensiblemente igual a la unidad. En asfaltos del mismo origen, el peso específico aumenta cuando la penetración disminuye. El método del picnómetro (ASTM D 70) es el más utilizado para su determinación. Generalmente se expresa en términos de peso específico a una temperatura dada para ambos materiales: agua y cemento asfáltico. Un peso específico de 1.030 a 25° C/°C significa que el cemento asfáltico tiene un peso específico de 1.030 cuando el agua y el cemento asfáltico están a una temperatura de 25 °C.⁷⁴

2.2. Agregados pétreos

Para la elaboración de carpetas de rodadura en caminos, el asfalto se utiliza mezclándose con agregados pétreos de características conocidas. No obstante, no cualquier agregado puede utilizarse de manera adecuada en carpetas asfálticas. Esto es debido a que cada uno de los agregados varía en sus características físicas y propiedades mecánicas, de ahí la necesidad de conocer con exactitud estas variantes con el fin de saber si es apto o no para su empleo en pavimentos.

2.2.1. Definición de agregados pétreos

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y 95 %, en peso, y entre el 75 y el 85 %, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado,

⁷⁴ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. p. 123.

debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.⁷⁵

2.2.2. Clasificación de agregados

“Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca”.⁷⁶

2.2.2.1. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua, o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de las areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas alcalizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceo y calcáreo. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un porcentaje alto de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, característicamente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de

⁷⁵ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 36.

⁷⁶ *Ibíd.*

partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.⁷⁷

2.2.2.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia, siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en cantera y posteriormente usadas.⁷⁸

2.2.2.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

⁷⁷ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 36.

⁷⁸ *Ibíd.*

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formada de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria).

“No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de las calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación”.⁷⁹

2.2.3. Tipos de agregados pétreos según su fuente

“Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales”.⁸⁰

2.2.3.1. Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares, por ejemplo, usualmente producen rocas

⁷⁹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 36 - 37.

⁸⁰ *Ibíd.* p. 37.

y guijarros redondeados. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra adentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.⁸¹

2.2.3.2. Agregados procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda

⁸¹ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 37.

a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado.

Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimento. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores a 6,35 mm (1/4 pulgada), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada, o procesada hasta tamaños máximos de 0,60 mm (No. 30).⁸²

⁸² Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 37 – 39.

2.2.3.3. Agregados artificiales

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Estos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.⁸³

2.2.4. Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño

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 presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.⁸⁴

⁸³ Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 39.

⁸⁴ *Ibíd.* p. 42.

2.2.4.1. Agregado fino

El agregado fino, según el Instituto del Asfalto y el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como partículas de un tamaño menor que 6,35 mm (1/4 pulgada) pero mayor que 0,075 mm (No. 200).

2.2.4.2. Agregado grueso

El agregado grueso, según el Instituto del Asfalto y el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como partículas de un tamaño igual o mayor que 6,35 mm (1/4 pulgada).

2.2.4.3. Polvo mineral o *filler*

Las partículas de un tamaño menor que 0,075 mm (No. 200) son conocidas como relleno mineral (*filler*), el cual consiste principalmente de limo y arcilla. Estas especificaciones están dadas por el Instituto del Asfalto y el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS).

2.2.5. Características de los agregados gruesos para su utilización en mezclas asfálticas

Según la Dirección General de Caminos, para que un agregado grueso pueda utilizarse en construcción de pavimentos flexibles, debe cumplir con los parámetros especificados a continuación:

2.2.5.1. Abrasión (AASHTO T 96)

El coeficiente de desgaste mecánico, realizado por medio de la máquina de Los Ángeles, debe ser menor o igual al 35 %.

2.2.5.2. Desintegración al sulfato de sodio (AASHTO T 104)

El coeficiente de desgaste químico, por medio del sulfato de sodio a 5 ciclos, debe ser igual o menor a 8 %.

2.2.5.3. Caras fracturadas (ASTM D 5821-95)

Como mínimo el 75 % de sus partículas debe tener 2 o más caras fracturadas, y el 90 % una cara fracturada.

2.2.5.4. Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)

Deben ser menor o igual a 8 %.

2.2.6. Características de los agregados finos para su utilización en mezclas asfálticas

Según la Dirección General de Caminos, para que un agregado fino pueda utilizarse en construcción de pavimentos flexibles, debe cumplir con los parámetros especificados a continuación:

2.2.6.1. Equivalente de arena (AASHTO T 176)

Debe ser mayor o igual a 35 %.

2.2.6.2. Índice plástico (AASHTO T 90)

Debe ser menor o igual a 4 %.

2.2.6.3. Graduación N°2 o N°3 (AASHTO M 29)

Esta especificación está destinada a describir material de un solo proveedor. Cuando se deba mezclar agregado fino de dos o más proveedores para producir una clasificación que cumpla los requisitos descritos en una norma para mezclas de pavimento asfáltico, no es necesario aplicar los requisitos descritos en la tabla VIII.⁸⁵

Tabla VIII. Requisitos de clasificación para agregados finos

Sieve Size	Amounts Finer Than Each Laboratory Sieve (Square Openings), Mass, %				
	Grading No. 1	Grading No. 2	Grading No. 3	Grading No. 4	Grading No. 5
9.5 mm (3/8 in.)	100	—	—	100	100
4.75 mm (No. 4)	95 to 100	100	100	80 to 100	80 to 100
2.36 mm (No. 8)	70 to 100	75 to 100	95 to 100	65 to 100	65 to 100
1.18 mm (No. 16)	40 to 80	50 to 74	85 to 100	40 to 80	40 to 80
600 µm (No. 30)	20 to 65	28 to 52	65 to 90	20 to 65	20 to 65
300 µm (No. 50)	7 to 40	8 to 30	30 to 60	7 to 40	7 to 46
150 µm (No. 100)	2 to 20	0 to 12	5 to 25	2 to 20	2 to 30
75 µm (No. 200)	0 to 10	0 to 5	0 to 5	0 to 10	—

Fuente: AASHTO M 29. *Fine aggregate for bituminous paving mixtures*. p. 1.

⁸⁵ AASHTO M 29. *Fine aggregate for bituminous paving mixtures*. p. 1.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla asfáltica

En este capítulo se presentan todos los datos utilizados y los respectivos cálculos de cada ensayo descrito.

3.1.1. Gravedad específica *Bulk*

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del cálculo de la gravedad específica *Bulk* (Gmb). Se hace la observación que los datos de los pesos tienen como unidad de medida el gramo.

3.1.1.1. Memoria de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del Gmb.

- Primera iteración

Datos:

Peso seco = 1 152,08 g

Peso seco saturado = 1 153,48 g

Peso sumergido = 643,18 g

$$G_{mb} = \frac{1\,152,08}{1\,153,48 - 643,18} = 2,26$$

- Segunda iteración

Datos:

Peso seco = 1 157,15 g

Peso seco saturado = 1 158,54 g

Peso sumergido = 651,34 g

$$G_{mb} = \frac{1\,157,15}{1\,158,54 - 651,34} = 2,28$$

- Tercera iteración

Datos:

Peso seco = 1 155,16 g

Peso seco saturado = 1 156,65 g

Peso sumergido = 648,70 g

$$G_{mb} = \frac{1\,155,16}{1\,156,65 - 648,70} = 2,27$$

3.1.1.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de gravedad específica *Bulk* para los tres diferentes tipos de arena implementados se muestran en las tablas siguientes:

Tabla IX. Resultados de gravedad específica *Bulk*, arena de río

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gmb	Promedio Gmb
1	5,50	1 152,08	1 153,48	643,18	2,26	2,27
2		1 157,15	1 158,54	651,34	2,28	
3		1 155,16	1 156,65	648,70	2,27	
4	6,00	1 136,13	1 138,29	638,41	2,27	2,28
5		1 129,52	1 132,19	632,64	2,26	
6		1 153,89	1 156,81	656,93	2,31	
7	6,50	1 160,61	1 162,12	659,18	2,31	2,29
8		1 161,94	1 163,07	658,09	2,30	
9		1 165,90	1 168,55	656,35	2,28	
10	7,00	1 166,31	1 167,20	662,24	2,31	2,31
11		1 167,50	1 168,49	663,30	2,31	
12		1 165,72	1 167,06	664,18	2,32	
13	7,50	1 167,00	1 168,02	666,78	2,33	2,32
14		1 165,58	1 166,95	664,75	2,32	
15		1 164,55	1 165,85	664,59	2,32	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Resultados de gravedad específica *Bulk*, arena triturada

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gmb	Promedio Gmb
1	4,50	1 126,32	1 129,49	618,47	2,20	2,22
2		1 145,33	1 147,46	634,46	2,23	
3		1 148,52	1 150,01	634,77	2,23	
4	5,00	1 141,84	1 145,67	622,99	2,18	2,23
5		1 152,47	1 155,15	641,90	2,25	
6		1 147,65	1 149,78	639,95	2,25	

Continuación de la tabla X.

7	5,50	1 156,37	1 158,93	645,59	2,25	2,26
8		1 156,30	1 162,29	653,73	2,27	
9		1 160,00	1 164,62	651,44	2,26	
10	6,00	1 160,39	1 163,46	657,32	2,29	2,29
11		1 164,12	1 166,87	657,30	2,28	
12		1 168,87	1 171,73	658,60	2,28	
13	6,50	1 166,87	1 168,37	661,66	2,30	2,31
14		1 165,96	1 168,22	663,60	2,31	
15		1 154,73	1 157,92	657,07	2,31	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de gravedad específica *Bulk*, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gmb	Promedio Gmb
1	6,00	1 140,05	1 141,71	541,22	1,90	1,88
2		1 139,87	1 141,69	541,03	1,90	
3		1 115,96	1 117,79	517,17	1,86	
4	6,50	1 096,11	1 097,98	527,47	1,92	1,89
5		1 136,64	1 139,34	536,71	1,89	
6		1 142,95	1 144,79	533,34	1,87	
7	7,00	1 122,30	1 124,10	534,34	1,90	1,91
8		1 151,49	1 154,61	554,33	1,92	
9		1 151,15	1 152,92	552,17	1,92	
10	7,50	1 144,00	1 145,92	545,13	1,90	1,92
11		1 158,50	1 159,85	559,15	1,93	
12		1 160,99	1 162,45	562,73	1,94	
13	8,00	1 162,14	1 163,98	563,59	1,94	1,94
14		1 166,23	1 167,61	567,53	1,94	
15		1 165,00	1 166,42	566,69	1,94	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Gravedad específica bruta de los agregados

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del cálculo de la gravedad específica bruta de los agregados (Gsb).

3.1.2.1. Memoria de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las únicas tres iteraciones realizadas para la determinación del Gsb:

- Primera iteración

Datos:

Pgrueso = 41,00 %

Pfino = 59,00 %

Ggrueso = 2,53

Gfino = 2,51

$$Gsb = \frac{41,00 + 59,00}{\frac{41,00}{2,53} + \frac{59,00}{2,51}} = 2,52$$

- Segunda iteración

Datos:

Pgrueso = 41,00%

Pfino = 59,00%

Ggrueso = 2,53

$$G_{\text{fino}} = 2,47$$

$$G_{\text{sb}} = \frac{41,00 + 59,00}{\frac{41,00}{2,53} + \frac{59,00}{2,47}} = 2,49$$

- Tercera iteración

Datos:

$$P_{\text{grueso}} = 41,00\%$$

$$P_{\text{fino}} = 59,00\%$$

$$G_{\text{grueso}} = 2,53$$

$$G_{\text{fino}} = 2,17$$

$$G_{\text{sb}} = \frac{41,00 + 59,00}{\frac{41,00}{2,53} + \frac{59,00}{2,17}} = 2,30$$

3.1.2.2. Resultados

Los resultados de los ensayos de gravedad específica bruta de los agregados para los tres diferentes tipos de arena implementados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Resultados de gravedad específica bruta de los agregados**

Tipo de arena	% Pgrueso	% Pfino	Ggrueso	Gfino	Gsb
Rio	41,00	59,00	2,53	2,51	2,52
Triturada	41,00	59,00	2,53	2,47	2,49
Comercial	41,00	59,00	2,53	2,17	2,30

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Gravedad específica teórica máxima *Rice*

A continuación, se presenta la determinación y análisis de la gravedad específica teórica máxima de las mezclas (Gmm). Se hace la observación que todos los pesos tienen como unidad de medida el gramo.

3.1.3.1. Muestra de cálculo

- Primera iteración

Datos:

Peso de la muestra = 1 140,51 g

Peso del matraz + agua = 7 379,40 g

Peso del matraz + agua + muestra = 8 059,10 g

$$Gmm = \frac{1\ 140,51}{1\ 140,51 + 7\ 379,40 - 8\ 059,10} = 2,48$$

- Segunda iteración

Datos:

Peso de la muestra = 1 152,60 g

Peso del matraz + agua = 7 381,10 g

Peso del matraz + agua + muestra = 8 061,20 g

$$G_{mm} = \frac{1\ 152,60}{1\ 152,60 + 7\ 381,10 - 8\ 061,20} = 2,44$$

- Tercera iteración

Datos:

Peso de la muestra = 1 152,20 g

Peso del matraz + agua = 7 381,90 g

Peso del matraz + agua + muestra = 8 062,10 g

$$G_{mm} = \frac{1\ 152,20}{1\ 152,20 + 7\ 381,90 - 8\ 062,10} = 2,44$$

3.1.3.2. Resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de gravedad específica teórica máxima *Rice* para los tres diferentes tipos de arena implementados se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XIII. **Resultados de gravedad específica teórica máxima *Rice*, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Peso Tara	Peso Tara + Muestra	Peso Muestra	Peso Matraz + Agua	Peso Matraz + Agua + Muestra	Gmm
1	5,50	242,19	1 382,70	1 140,51	7 379,40	8 059,10	2,48
2	6,00	262,90	1 415,50	1 152,60	7 381,10	8 061,20	2,44
3	6,50	256,90	1 409,10	1 152,20	7 381,90	8 062,10	2,44
4	7,00	242,30	1 402,10	1 159,80	7 381,10	8 057,40	2,40
5	7,50	260,20	1 417,50	1 157,30	7 381,10	8 057,10	2,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de gravedad específica teórica máxima *Rice*, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Peso Tara	Peso Tara + Muestra	Peso Muestra	Peso Matraz + Agua	Peso Matraz + Agua + Muestra	Gmm
1	4,50	241,40	1 375,90	1 134,50	7 381,30	8 035,10	2,36
2	5,00	259,20	1 388,80	1 129,60	7 379,50	8 030,20	2,36
3	5,50	251,10	1 414,70	1 163,60	7 379,50	8 046,90	2,35
4	6,00	239,90	1 398,50	1 158,60	7 381,30	8 047,40	2,35
5	6,50	258,10	1 419,30	1 161,20	7 381,30	8 046,20	2,34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de gravedad específica teórica máxima *Rice*, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Peso Tara	Peso Tara + Muestra	Peso Muestra	Peso Matraz + Agua	Peso Matraz + Agua + Muestra	Gmm
1	6,00	265,80	1 302,20	1 036,40	7 379,50	7 952,50	2,24
2	6,50	242,40	1 328,30	1 085,90	7 380,70	7 974,40	2,21
3	7,00	231,80	1 375,20	1 143,40	7 380,70	8 001,70	2,19
4	7,50	260,50	1 409,80	1 149,30	7 382,10	8 001,10	2,17
5	8,00	255,90	1 421,20	1 165,30	7 382,10	8 008,60	2,16

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Gravedad específica efectiva de los agregados

En este subcapítulo se presenta la determinación y análisis de la gravedad específica efectiva de los agregados (Gse).

3.1.4.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del Gse.

- Primera iteración

Datos:

Pac = 5,50 %

Gmm = 2,48

Gac = 1,057

$$Gse = \frac{100 - 5,50}{\frac{100}{2,48} - \frac{5,50}{1,057}} = 2,68$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Pac = 6,00 \%$$

$$Gmm = 2,44$$

$$Gac = 1,057$$

$$Gse = \frac{100 - 7,00}{\frac{100}{2,44} - \frac{7,00}{1,057}} = 2,66$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Pac = 6,50 \%$$

$$Gmm = 2,44$$

$$Gac = 1,057$$

$$Gse = \frac{100 - 6,50}{\frac{100}{2,44} - \frac{6,50}{1,057}} = 2,69$$

3.1.4.2. Resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de gravedad específica efectiva de los agregados, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XVI. **Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Gmm	Gac	Gse
1	5,50	2,48	1,057	2,68
2	6,00	2,44	1,057	2,66
3	6,50	2,44	1,057	2,69
4	7,00	2,40	1,057	2,65
5	7,50	2,40	1,057	2,68

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Gmm	Gac	Gse
1	4,50	2,36	1,057	2,51
2	5,00	2,36	1,057	2,52
3	5,50	2,35	1,057	2,52
4	6,00	2,35	1,057	2,55
5	6,50	2,34	1,057	2,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de gravedad específica efectiva de los agregados, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Gmm	Gac	Gse
1	6,00	2,24	1,057	2,41
2	6,50	2,21	1,057	2,39
3	7,00	2,19	1,057	2,38
4	7,50	2,17	1,057	2,37
5	8,00	2,16	1,057	2,38

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Peso unitario de la mezcla asfáltica

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del peso unitario de la mezcla asfáltica compactada, PU.

3.1.5.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del PU.

- Primera iteración

Datos:

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

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

$$PU = (2,30)\left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 2,27$$

- Segunda iteración

Datos:

$$G_{mb} = 2,28$$

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

$$PU = (2,28) \left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 2,28$$

- Tercera iteración

Datos:

$$G_{mb} = 2,29$$

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

$$PU = (2,29) \left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 2,29$$

3.1.5.2. Resultados

Los resultados obtenidos en el ensayo de peso unitario de la mezcla asfáltica compactada, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XIX. **Resultados de peso unitario, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Gmb Promedio	ρ (1 g/cm³)	PU (1 g/cm³)
1	5,50	2,27	1,00	2,27
2				
3				
4	6,00	2,28	1,00	2,28
5				
6				
7	6,50	2,29	1,00	2,29
8				
9				
10	7,00	2,31	1,00	2,31
11				
12				
13	7,50	2,32	1,00	2,32
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultado de peso unitario, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Gmb Promedio	ρ (1 g/cm³)	PU (1 g/cm³)
1	4,50	2,22	1,00	2,22
2				
3				
4	5,00	2,23	1,00	2,23
5				
6				
7	5,50	2,26	1,00	2,26
8				
9				

Continuación de la tabla XX.

10	6,00	2,29	1,00	2,29
11				
12				
13	6,50	2,31	1,00	2,31
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Resultado de peso unitario, arena comercial

Probeta	% Bitumen	Gmb Promedio	ρ (1 g/cm³)	PU (1 g/cm³)
1	6,00	1,88	1,00	1,88
2				
3				
4	6,50	1,89	1,00	1,89
5				
6				
7	7,00	1,91	1,00	1,91
8				
9				
10	7,50	1,92	1,00	1,92
11				
12				
13	8,00	1,94	1,00	1,94
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Porcentaje de vacíos-densidad

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica (% VA).

3.1.6.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del % VA.

- Primera iteración

Datos:

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

$$G_{mm} = 2,48$$

$$VA = \frac{2,48 - 2,27}{2,48} \times 100 = 8,24 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$G_{mb} = 2,28$$

$$G_{mm} = 2,44$$

$$VA = \frac{2,44 - 2,28}{2,44} \times 100 = 6,50 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

Gmb = 2,29

Gmm = 2,44

$$VA = \frac{2.44 - 2,29}{2.44} \times 100 = 5,99 \%$$

3.1.6.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos-densidad de la mezcla asfáltica compactada, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXII. **Resultados de vacío-densidad, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gmm	% VA
1	5,50	2,27	2,48	8,24
2	6,00	2,28	2,44	6,50
3	6,50	2,29	2,44	5,99
4	7,00	2,31	2,40	3,58
5	7,50	2,32	2,40	3,34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de vacío-densidad, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gmm	% VA
1	4,50	2,22	2,36	5,85
2	5,00	2,23	2,36	5,58
3	5,50	2,26	2,35	3,53
4	6,00	2,29	2,35	2,87
5	6,50	2,31	2,34	1,43

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resultados de vacío-densidad, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gmm	% VA
1	6,00	1,88	2,24	15,73
2	6,50	1,89	2,21	14,23
3	7,00	1,91	2,19	12,62
4	7,50	1,92	2,17	11,28
5	8,00	1,94	2,16	10,27

Fuente: elaboración propia.

3.1.7. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VAM).

3.1.7.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del %VAM.

- Primera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,27$$

$$Ps = 94,50 \%$$

$$Gsb = 2,52$$

$$VMA = 100 - \frac{2,27 * 94,50}{2,52} = 14,77 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gmb = 2,28$$

$$Ps = 94,00 \%$$

$$Gsb = 2,52$$

$$VMA = 100 - \frac{2,28 * 94,00}{2,52} = 14,86 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Gmb = 2,29$$

$$Ps = 93,50 \%$$

$$Gsb = 2,52$$

$$\text{VMA} = 100 - \frac{2,29 * 93,50}{2,52} = 14,79 \%$$

3.1.7.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXV. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gsb	Ps	% VAM
1	5,50	2,27	2,52	94,50	14,77
2	6,00	2,28	2,52	94,00	14,86
3	6,50	2,29	2,52	93,50	14,79
4	7,00	2,31	2,52	93,00	14,58
5	7,50	2,32	2,52	92,50	14,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gsb	Ps	% VAM
1	4,50	2,22	2,49	95,50	14,93
2	5,00	2,23	2,49	95,00	15,18
3	5,50	2,26	2,49	94,50	14,29
4	6,00	2,29	2,49	94,00	13,89
5	6,50	2,31	2,49	93,50	13,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Gmb	Gsb	Ps	% VAM
1	6,00	1,88	2,30	94,00	23,12
2	6,50	1,89	2,30	93,50	23,23
3	7,00	1,91	2,30	93,00	22,82
4	7,50	1,92	2,30	92,50	22,82
5	8,00	1,94	2,30	92,00	22,53

Fuente: elaboración propia.

3.1.8. Porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico (% VFA).

3.1.8.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del % VFA.

- Primera iteración

Datos:

VA = 8,24 %

VAM = 14,77 %

$$VFA = 100 \times \frac{14,77 - 8,24}{14,77} = 44,22 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

VA = 6,50 %

VAM = 14,86 %

$$VFA = 100 \times \frac{14,86 - 6,50}{14,86} = 56,25 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

VA = 5,99 %

VAM = 14,79 %

$$VFA = 100 \times \frac{14,79 - 5,99}{14,79} = 59,51 \%$$

3.1.8.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXVIII. **Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena de río**

Probeta	% Bitumen	% VA	% VAM	% VFA
1	5,50	8,24	14,77	44,22
2	6,00	6,50	14,86	56,25
3	6,50	5,99	14,79	59,51
4	7,00	3,58	14,58	75,46
5	7,50	3,34	14,63	77,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	% VA	% VAM	% VFA
1	4,50	5,85	13,55	56,78
2	5,00	5,58	13,89	59,78
3	5,50	3,53	14,29	75,30
4	6,00	2,87	15,18	81,11
5	6,50	1,43	14,93	90,44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Resultados de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	% VA	% VAM	% VFA
1	6,00	15,73	23,12	31,97
2	6,50	14,23	23,23	38,72
3	7,00	12,62	22,82	44,68
4	7,50	11,28	22,82	50,58
5	8,00	10,27	22,53	54,39

Fuente: elaboración propia.

3.1.9. Relación relleno mineral / asfalto

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación de la relación relleno mineral/asfalto (F/A).

3.1.9.1. Muestra de cálculo del porcentaje de ligante asfáltico absorbido

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del % Pba.

- Primera iteración

Datos:

Gac = 1,06

Gsb = 2,52

Gse = 2,68

Pac = 5,50 %

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,68 - 2,52)}{2,68 * 2,52} = 2,60 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

$$Gac = 1,06$$

$$Gsb = 2,52$$

$$Gse = 2,66$$

$$Pac = 6,00 \%$$

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,66 - 2,52)}{2,66 * 2,52} = 2,26 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

$$Gac = 1,06$$

$$Gsb = 2,52$$

$$Gse = 2,69$$

$$Pac = 6,50 \%$$

$$Pba = \frac{100 * 1,06 * (2,69 - 2,52)}{2,69 * 2,52} = 2,62 \%$$

3.1.9.2. Resultados del porcentaje de ligante asfáltico absorbido

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de ligante asfáltico absorbido para la implementación de arena de río, arena triturada y arena comercial, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXXI. **Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Gac	Gse	Gsb	%Pba
1	5,50	1,06	2,68	2,52	2,60
2	6,00	1,06	2,66	2,52	2,26
3	6,50	1,06	2,69	2,52	2,62
4	7,00	1,06	2,65	2,52	2,12
5	7,50	1,06	2,68	2,52	2,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Gac	Gse	Gsb	%Pba
1	4,50	1,06	2,51	2,49	0,19
2	5,00	1,06	2,52	2,49	0,47
3	5,50	1,06	2,52	2,49	0,50
4	6,00	1,06	2,55	2,49	0,96
5	6,50	1,06	2,56	2,49	1,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de ligante asfáltico absorbido, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Gac	Gse	Gsb	%Pba
1	6,00	1,06	2,41	2,30	1,97
2	6,50	1,06	2,39	2,30	1,58
3	7,00	1,06	2,38	2,30	1,47
4	7,50	1,06	2,37	2,30	1,25
5	8,00	1,06	2,38	2,30	1,44

Fuente: elaboración propia.

3.1.9.3. Muestra de cálculo del porcentaje de ligante asfáltico efectivo

Una vez determinados los porcentajes de ligante asfáltico absorbido se procede a realizar el cálculo de los valores del porcentaje de ligante asfáltico efectivo. A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del Pbe.

- Primera iteración

Datos:

Pba = 2,60 %

Pac = 5,50 %

Ps = 94,50 %

$$Pbe = 5,50 - \frac{2,60 * 94,50}{100} = 3,04 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

Pba = 2,26 %

Pac = 6,00 %

Ps = 94,00 %

$$Pbe = 6,00 - \frac{2,26 * 94,00}{100} = 3,87 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

Pba = 2,62 %

Pac = 6,50 %

Ps = 93,50 %

$$Pbe = 6,50 - \frac{2,62 * 93,50}{100} = 4,05 \%$$

3.1.9.4. Resultados del porcentaje de ligante asfáltico efectivo

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de ligante asfáltico efectivo para la implementación de arena de río, arena triturada y arena comercial se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXXIV. **Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena de río**

Probeta	% Bitumen	% Pba	% Ps	% Pbe
1	5,50	2,60	94,50	3,04
2	6,00	2,26	94,00	3,87
3	6,50	2,62	93,50	4,05
4	7,00	2,12	93,00	5,03
5	7,50	2,56	92,50	5,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	% Pba	% Ps	% Pbe
1	4,50	0,19	95,50	4,32
2	5,00	0,47	95,00	4,55
3	5,50	0,50	94,50	5,03
4	6,00	0,96	94,00	5,10
5	6,50	1,01	93,50	5,55

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Porcentaje de ligante asfáltico efectivo, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	% Pba	% Ps	% Pbe
1	6,00	1,97	94,00	4,15
2	6,50	1,58	93,50	5,02
3	7,00	1,47	93,00	5,64
4	7,50	1,25	92,50	6,34
5	8,00	1,44	92,00	6,67

Fuente: elaboración propia.

3.1.9.5. Muestra de cálculo de relación relleno mineral/asfalto

Una vez determinados los porcentajes de ligante asfáltico efectivo se procede a calcular los valores de la relación relleno mineral/asfalto. A continuación se presentan las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del F/A.

- Primera iteración

Datos:

Porcentaje que pasa tamiz No. 200 = 6,00 %

Pbe = 3,04 %

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{3,04} = 1,97 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

Porcentaje que pasa tamiz No. 200 = 6,00 %

Pbe = 3,87 %

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{3,87} = 1,55 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

Porcentaje que pasa tamiz No. 200 = 6,00 %

Pbe = 4,05 %

$$\frac{F}{A} = \frac{6,00}{4,05} = 1,48 \%$$

3.1.9.6. Resultados de relación relleno mineral/asfalto

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de relación relleno mineral/asfalto para la implementación de arena de río, arena triturada y arena comercial, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XXXVII. **Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena de río**

Probeta	% Bitumen	%Pasa tamiz 200	%Pbe	F/A
1	5,50	6,00	3,04	1,97
2	6,00	6,00	3,87	1,55
3	6,50	6,00	4,05	1,48
4	7,00	6,00	5,03	1,19
5	7,50	6,00	5,13	1,17

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	%Pasa tamiz 200	%Pbe	F/A
1	4,50	6,00	4,32	1,39
2	5,00	6,00	4,55	1,32
3	5,50	6,00	5,03	1,19
4	6,00	6,00	5,10	1,18
5	6,50	6,00	5,55	1,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Porcentaje de relación relleno mineral/asfalto, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	% Pasa tamiz 200	%Pbe	F/A
1	6,00	6,00	4,15	1,45
2	6,50	6,00	5,02	1,19
3	7,00	6,00	5,64	1,06
4	7,50	6,00	6,34	0,95
5	8,00	6,00	6,67	0,90

Fuente: elaboración propia.

3.1.10. Contenido de humedad

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación del porcentaje de contenido de humedad (% H).

3.1.10.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación del % H.

- Primera iteración

Datos:

Peso seco = 1 155,16 g

Peso seco saturado = 1 156,65 g

Peso sumergido = 637,70 g

$$\%H = \frac{1\ 156,65 - 1\ 155,16}{1\ 156,65 - 637,70} = 0,29 \%$$

- Segunda iteración

Datos:

Peso seco = 1 157,15 g

Peso seco saturado = 1 158,54 g

Peso sumergido = 638,34 g

$$\%H = \frac{1\ 157,15 - 1\ 158,54}{1\ 157,15 - 638,34} = 0,27 \%$$

- Tercera iteración

Datos:

Peso seco = 1 152,08 g

Peso seco saturado = 1 153,48 g

Peso sumergido = 631,18 g

$$\%H = \frac{1\ 152,08 - 1\ 153,48}{1\ 152,08 - 631,18} = 0,27\ \%$$

3.1.10.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de porcentaje de contenido de humedad, para los tres diferentes tipos de arena implementados, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XL. **Resultados de contenido de humedad, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	% H	% H Promedio
1	5,50	1 155,16	1 156,65	637,70	0,29	0,27
2		1 157,15	1 158,54	638,34	0,27	
3		1 152,08	1 153,48	631,18	0,27	
4	6,00	1 153,89	1 156,81	627,93	0,55	0,50
5		1 129,52	1 132,19	624,64	0,53	
6		1 136,13	1 138,29	624,41	0,42	
7	6,50	1 165,90	1 168,55	644,35	0,51	0,34
8		1 161,94	1 163,07	647,09	0,22	
9		1 160,61	1 162,12	650,18	0,29	

Continuación de la tabla XL.

10	7,00	1 165,72	1 167,06	650,18	0,26	0,21
11		1 167,50	1 168,49	651,30	0,19	
12		1 166,31	1 167,20	658,24	0,17	
13	7,50	1 164,55	1 165,85	655,59	0,25	0,24
14		1 165,58	1 166,95	661,75	0,27	
15		1 167,00	1 168,02	661,78	0,20	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Resultados de contenido de humedad, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	% H	% H Promedio
1	4,50	1 126,32	1 129,49	601,47	0,60	0,42
2		1 145,33	1 147,46	608,46	0,40	
3		1 148,52	1 150,01	609,77	0,28	
4	5,00	1 141,84	1 145,67	611,99	0,72	0,54
5		1 152,47	1 155,15	622,90	0,50	
6		1 147,65	1 149,78	612,95	0,40	
7	5,50	1 156,37	1 158,93	630,59	0,48	0,83
8		1 156,30	1 162,29	630,73	1,13	
9		1 160,00	1 164,62	632,44	0,87	
10	6,00	1 160,39	1 163,46	645,32	0,59	0,55
11		1 164,12	1 166,87	638,30	0,52	
12		1 168,87	1 171,73	644,60	0,54	
13	6,50	1 166,87	1 168,37	645,66	0,29	0,44
14		1 165,96	1 168,22	637,50	0,43	
15		1 154,73	1 157,92	643,07	0,62	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Resultados de contenido de humedad, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Peso seco	Peso seco saturado	Peso sumergido	% H	% H Promedio
1	6,00	1 140,05	1 141,71	546,22	0,28	0,30
2		1 139,87	1 141,69	540,03	0,30	
3		1 115,96	1 117,79	556,17	0,33	
4	6,50	1 096,11	1 097,98	542,47	0,34	0,36
5		1 136,64	1 139,34	524,71	0,44	
6		1 142,95	1 144,79	543,34	0,31	
7	7,00	1 122,30	1 124,10	550,34	0,31	0,38
8		1 151,49	1 154,61	564,33	0,53	
9		1 151,15	1 152,92	565,17	0,30	
10	7,50	1 144,00	1 145,92	561,13	0,33	0,27
11		1 158,50	1 159,85	562,15	0,23	
12		1 160,99	1 162,45	577,73	0,25	
13	8,00	1 162,14	1 163,98	573,59	0,31	0,26
14		1 166,23	1 167,61	585,53	0,24	
15		1 165,00	1 166,42	576,69	0,24	

Fuente: elaboración propia.

3.1.11. Estabilidad-Flujo Marshall

En este subcapítulo se presenta el análisis y determinación de la estabilidad-flujo Marshall.

3.1.11.1. Muestra de cálculo

A continuación se presenta la muestra de cálculo de las primeras tres iteraciones realizadas para la determinación de la estabilidad-flujo Marshall.

- Primera iteración

Datos:

Estabilidad Marshall (no corregida) = 186,00

Flujo = 11,00

- La lectura tomada del anillo dinamométrico se convierte a libras con la hoja de cargas de anillo (ver anexo 5).

Estabilidad = 186,00 equivale a 1 760,61 lbf

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

Estabilidad = (1 760,61) (0,93) = 1 637,37 lbf

- Segunda iteración

Datos:

Estabilidad Marshall (no corregida) = 194,00

Flujo = 13,00

- La lectura tomada del anillo dinamométrico se convierte a libras con la hoja de cargas de anillo (ver anexo 5).

Estabilidad = 194,00 equivale a 1 835,93 lbf

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

Estabilidad = (1 835,93) (1,00) = 1 835,93 lbf

- Tercera iteración

Datos:

Estabilidad Marshall (no corregida) = 210,00

Flujo = 10,00

- La lectura tomada del anillo dinamométrico se convierte a libras con la hoja de cargas de anillo (ver anexo 5).

Estabilidad = 210,00 equivale a 1 986,59 lbf

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

Estabilidad = (1 986,59) (1,00) = 1 986,59 lbf

3.1.11.2. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de estabilidad-flujo Marshall, para la implementación de los diferentes tipos de arena, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla XLIII. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena de río**

Probeta	% Bitumen	Lectura Dinamométrico	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Promedio Estabilidad	Flujo (0.01")	Promedio flujo
1	5,50	186,00	1 760,61	0,93	1 637,37	1 819,96	11,00	11,33
2		194,00	1 835,93	1,00	1 835,93		13,00	
3		210,00	1 986,59	1,00	1 986,59		10,00	
4	6,00	277,00	2 617,44	0,96	2 512,74	2 199,39	11,00	12,00
5		225,00	2 127,82	0,96	2 042,71		12,00	
6		225,00	2 127,82	0,96	2 042,71		13,00	
7	6,50	309,00	2 918,74	1,00	2 918,74	3 196,06	15,00	12,67
8		334,00	3 154,13	1,00	3 154,13		10,00	
9		358,00	3 380,11	1,04	3 515,31		13,00	
10	7,00	295,00	2 786,92	0,96	2 675,44	2 837,64	13,00	13,00
11		309,00	2 918,74	1,00	2 918,74		14,00	
12		309,00	2 918,74	1,00	2 918,74		12,00	
13	7,50	244,00	2 306,72	1,00	2 306,72	2 464,15	15,00	13,67
14		231,00	2 184,32	1,00	2 184,32		15,00	
15		320,00	3 022,31	0,96	2 901,42		11,00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena triturada**

Probeta	% Bitumen	Lectura Dinamométrico	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Promedio Estabilidad	Flujo (0.01")	Promedio flujo
1	4,50	229,00	2 165,48	0,89	1 927,28	1 993,85	11,00	13,00
2		240,00	2 269,06	0,93	2 110,22		13,00	
3		231,00	2 184,32	0,89	1 944,04		15,00	
4	5,00	277,00	2 617,44	0,93	2 434,22	2 127,74	16,00	13,00
5		201,00	1 901,84	0,93	1 768,72		12,00	
6		248,00	2 344,38	0,93	2 180,28		11,00	
7	5,50	332,00	3 135,30	0,96	3 009,89	2 803,22	15,00	13,33
8		274,00	2 589,19	0,93	2 407,95		12,00	
9		330,00	3 116,47	0,96	2 991,81		13,00	
10	6,00	293,00	2 768,09	0,96	2 657,37	2 520,27	16,00	15,00
11		303,00	2 862,25	0,93	2 661,89		14,00	
12		247,00	2 334,97	0,96	2 241,57		15,00	
13	6,50	223,00	2 108,99	0,93	1 961,36	2 022,13	16,00	15,33
14		219,00	2 071,33	0,93	1 926,33		16,00	
15		259,00	2 447,96	0,89	2 178,68		14,00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall, arena comercial**

Probeta	% Bitumen	Lectura Dinamométrico	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbf)	Promedio Estabilidad	Flujo (0.01")	Promedio flujo
1	6,00	295,00	2 786,92	0,86	2 396,75	2 390,98	12,00	12,00
2		297,00	2 805,75	0,76	2 132,37		13,00	
3		359,00	3 389,53	0,78	2 643,83		11,00	
4	6,50	325,00	3 069,39	0,81	2 486,21	2 580,80	12,00	12,67
5		372,00	3 511,93	0,83	2 914,90		14,00	
6		306,00	2 890,49	0,81	2 341,30		12,00	

Continuación de la tabla XLV.

7	7,00	394,00	3 719,07	0,78	2 900,88	2 952,69	15,00	13,67
8		409,00	3 860,31	0,78	3 011,04		15,00	
9		376,00	3 549,59	0,83	2 946,16		11,00	
10	7,50	352,00	3 323,62	0,81	2 692,13	2 784,31	14,00	14,00
11		357,00	3 370,69	0,81	2 730,26		16,00	
12		374,00	3 530,76	0,83	2 930,53		12,00	
13	8,00	324,00	3 059,98	0,81	2 478,58	2 460,78	14,00	16,00
14		315,00	2 975,23	0,81	2 409,94		15,00	
15		326,00	3 078,81	0,81	2 493,83		19,00	

Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis e interpretación de resultados

En esta sección se presentan los resultados finales con sus gráficas correspondientes a cada uno de los diseños calculados, de tal forma que se pueda establecer una comparación de los mismos y así consecuentemente proceder con su respectiva interpretación.

La metodología aplicada en esta sección sirve para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados para los distintos diseños de mezcla asfáltica con base en los tipos de arena implementados, es decir, para arena de río, arena triturada y arena comercial. La norma utilizada es ASTM D 1559.

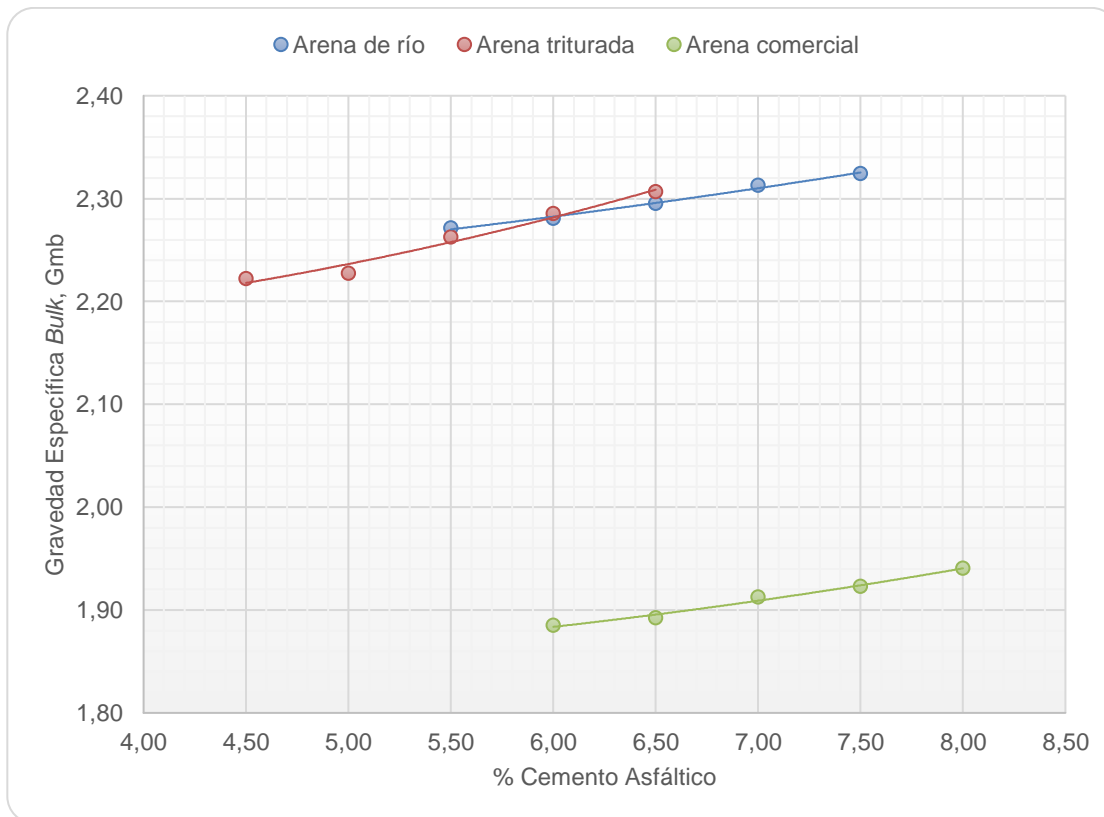
La interpretación de resultados de la investigación se presenta para la mezcla asfáltica en caliente que posee como característica principal una granulometría controlada, variando el tipo de agregado fino (arena de río, arena triturada y arena comercial) y el porcentaje de cemento asfáltico con base en el peso y ha sido obtenida de los valores presentados en las tablas y gráficas comparativas.

Tabla XLVI. **Comparación de gravedad específica *Bulk***

Probeta	% Bitumen	Arena de río Gmb	% Bitumen	Arena triturada Gmb	% Bitumen	Arena comercial Gmb
1	5,50	2,27	4,50	2,22	6,00	1,88
2	6,00	2,28	5,00	2,23	6,50	1,89
3	6,50	2,29	5,50	2,26	7,00	1,91
4	7,00	2,31	6,00	2,29	7,50	1,92
5	7,50	2,32	6,50	2,31	8,00	1,94

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Grafica comparativa de gravedad específica *Bulk***



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Diseño para granulometría en gravedad específica *Bulk*

El comportamiento de la gravedad específica *Bulk*, para la implementación de los tres diferentes tipos de arena implementados, presenta un incremento en sus gráficas con respecto al incremento del cemento asfáltico utilizado para cada punto. Se puede decir que es directamente proporcional al porcentaje en peso del bitumen y por ende presenta un comportamiento lineal con pendiente positiva.

Los valores obtenidos para la implementación de arena comercial, debido a sus propiedades físicas, tiene una menor densidad comparada con la arena de río y la arena triturada, esto hace que la densidad de *Bulk* sea mucho menos densa. Al perder densidad, en la mayoría de los casos implica perder otras propiedades importantes que se deben cumplir en las mezclas bituminosas.

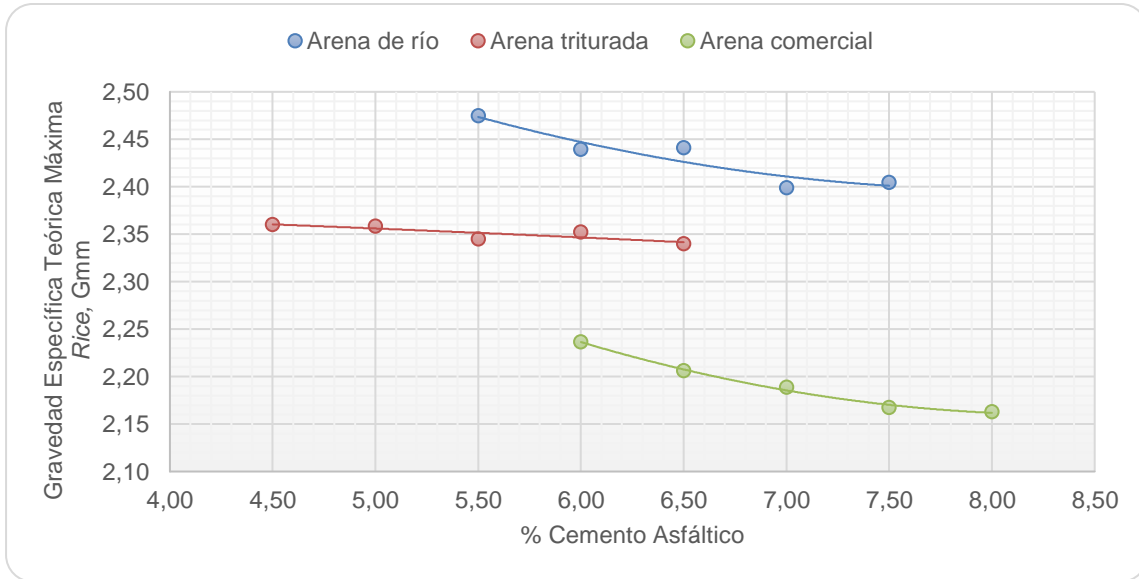
La tabla comparativa de datos refleja que la cantidad de bitumen requerida entre la arena de río y triturada es similar, sin embargo, la arena comercial, al tener una mayor presencia de material pómez, absorbe una mayor cantidad de cemento asfáltico.

Tabla XLVII. Comparación de gravedad específica teórica máxima *Rice*

Probeta	% Bitumen	Arena de río Gmm	% Bitumen	Arena triturada Gmm	% Bitumen	Arena comercial Gmm
1	5,50	2,48	4,50	2,36	6,00	2,24
2	6,00	2,44	5,00	2,36	6,50	2,21
3	6,50	2,44	5,50	2,35	7,00	2,19
4	7,00	2,40	6,00	2,35	7,50	2,17
5	7,50	2,40	6,50	2,34	8,00	2,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica comparativa de gravedad específica teórica máxima *Rice***



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. **Diseño para granulometría en gravedad específica teórica máxima *Rice***

La densidad específica teórica máxima *Rice* denota la composición de la mezcla asfáltica en función de la cantidad de agregados y cemento asfáltico sin compactar, es decir, representa la cantidad de vacíos presentes en ella.

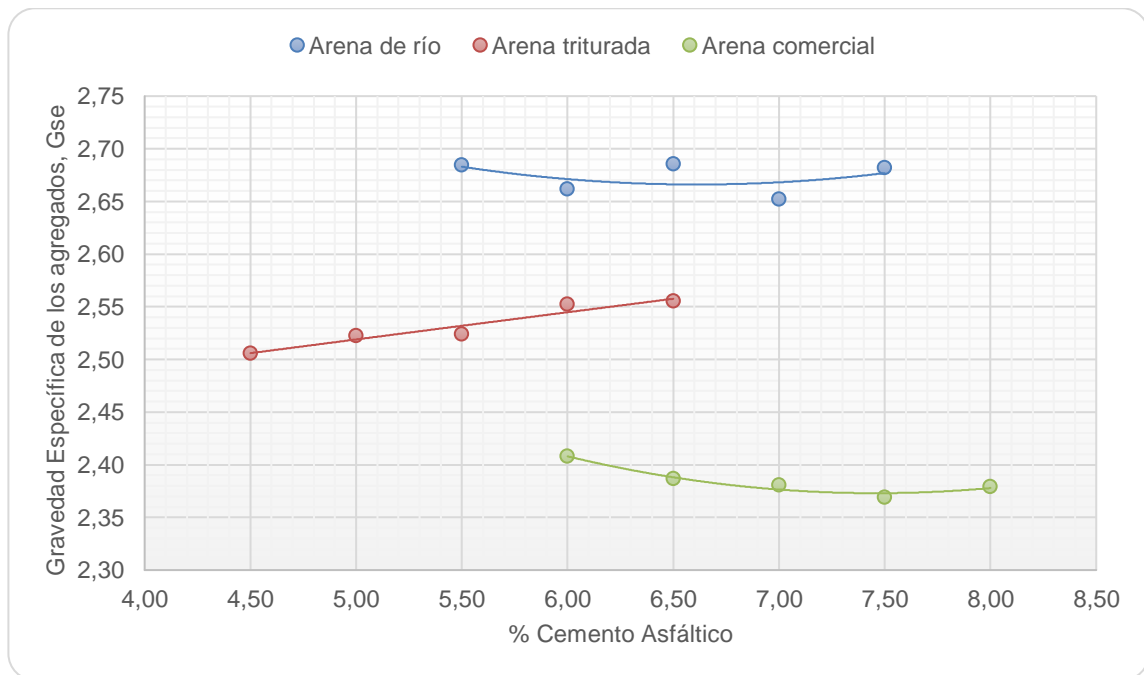
El comportamiento que se observa en la gráfica indica que, a mayor cantidad de cemento asfáltico, la densidad tiende a disminuir, caso contrario a la densidad *Bulk* donde la misma se ve en aumento. Esta tendencia a disminuir de la gráfica se presenta de una manera uniforme y con cambios significativamente menos drásticos en la arena triturada, debido al mejor comportamiento granulométrico de las partículas en este tipo de arena.

Tabla XLVIII. **Comparación de gravedad específica efectiva de los agregados**

Probeta	% Bitumen	Arena de río Gse	% Bitumen	Arena triturada Gse	% Bitumen	Arena comercial Gse
1	5,50	2,68	4,50	2,51	6,00	2,41
2	6,00	2,66	5,00	2,52	6,50	2,39
3	6,50	2,69	5,50	2,52	7,00	2,38
4	7,00	2,65	6,00	2,55	7,50	2,37
5	7,50	2,68	6,50	2,56	8,00	2,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica comparativa de gravedad específica efectiva de los agregados**



Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Diseño para granulometría de gravedad específica efectiva de los agregados

La gravedad específica efectiva de los agregados está en función de la gravedad específica teórica máxima y de la gravedad específica del cemento asfáltico implementado para el diseño de la mezcla asfáltica, para este caso, AC-20.

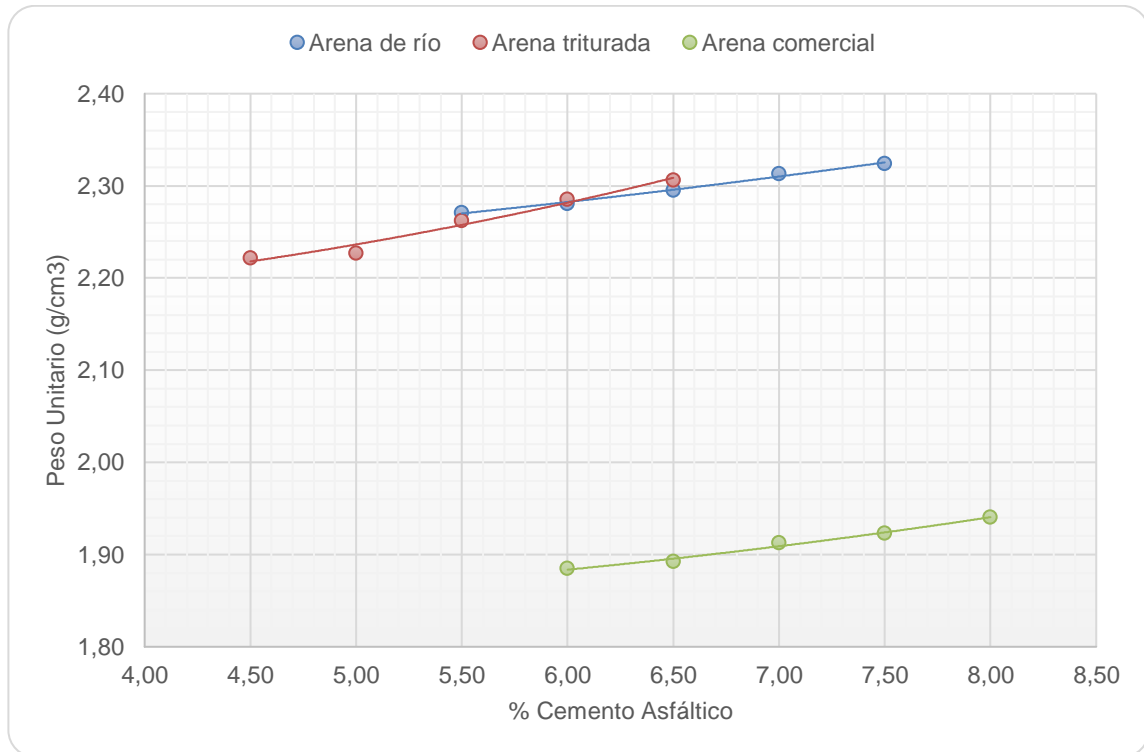
En la gráfica, se puede observar de nuevo que la tendencia es de mayor peso en la mezcla realizada con arena de río, sin embargo, esta presenta una tendencia parabólica y en disminución, contrario a las propiedades mecánicas expuestas de la arena triturada, ya que en esta se mantiene una tendencia lineal creciente, esto debido a que el agregado tiene una cantidad menor de variaciones abruptas granulométricas entre los tamaños de partículas. El gráfico de la arena comercial y la arena de río mantiene una orientación a disminuir su peso efectivo con respecto a la cantidad de material cementante.

Tabla XLIX. Comparación de peso unitario en la mezcla

Probeta	% Bitumen	Arena de río PU (g/cm ³)	% Bitumen	Arena triturada PU (g/cm ³)	% Bitumen	Arena comercial PU (g/cm ³)
1	5,50	2,27	4,50	2,22	6,00	1,88
2	6,00	2,28	5,00	2,23	6,50	1,89
3	6,50	2,29	5,50	2,26	7,00	1,91
4	7,00	2,31	6,00	2,29	7,50	1,92
5	7,50	2,32	6,50	2,31	8,00	1,94

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica comparativa de peso unitario en la mezcla**



Fuente: elaboración propia.

4.1.4. **Diseño para peso unitario de la mezcla**

La mezcla asfáltica diseñada en caliente, al ser compactada, obtiene una propiedad característica en función del volumen y el contenido del cemento asfáltico aplicado, la cual es denotada como peso unitario.

El comportamiento presentado por los valores del peso unitario de la mezcla asfáltica es, por tendencia, semejante a la presentada en la gráfica comparativa de la gravedad específica *Bulk* en los tres tipos de arenas

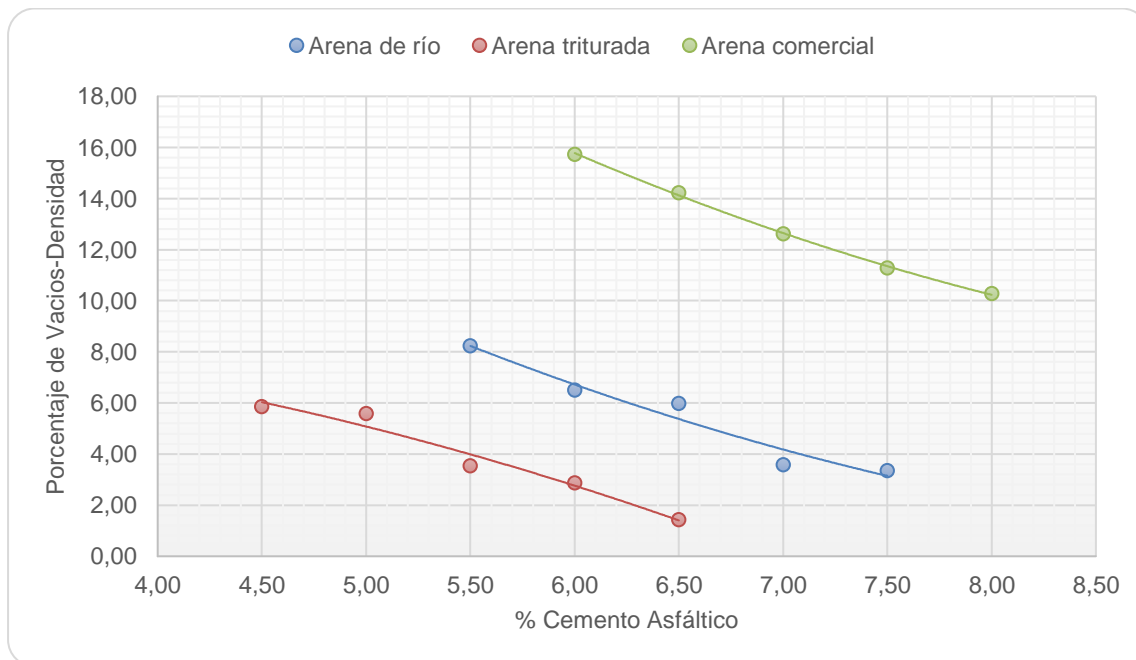
utilizadas. Presenta una línea de tendencia de primer grado creciente proporcionalmente al aumento del porcentaje del cemento asfáltico.

Tabla L. **Comparación de porcentaje vacíos-densidad**

Probeta	% Bitumen	Arena de río % VA	% Bitumen	Arena triturada % VA	% Bitumen	Arena comercial % VA
1	5,50	8,24	4,50	5,85	6,00	15,73
2	6,00	6,50	5,00	5,58	6,50	14,23
3	6,50	5,99	5,50	3,53	7,00	12,62
4	7,00	3,58	6,00	2,87	7,50	11,28
5	7,50	3,34	6,50	1,43	8,00	10,27

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica comparativa de porcentaje vacíos-densidad**



Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos-densidad

Para el diseño de mezcla asfáltica en caliente se busca obtener un valor apropiado de porcentaje de vacíos, siendo el rango aceptable de 3 % a 5 %, siendo este el alcance establecido en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes* (ver anexo 6: Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico). Esto con el objetivo de brindarle una mayor manejabilidad a la mezcla.

Las gráficas determinan que el comportamiento del diseño de mezcla para la implementación de arena triturada contempla un rango de 5,85 % a 1,43 % cuando el porcentaje de cemento asfáltico comprende un rango de 4,50 % a 6,50 %. Esto implica que la arena triturada posee una graduación entre sus partículas adecuada y manejable para mantener el porcentaje de vacíos entre un 3 % y 5 %, que es lo ideal según las especificaciones antes mencionadas.

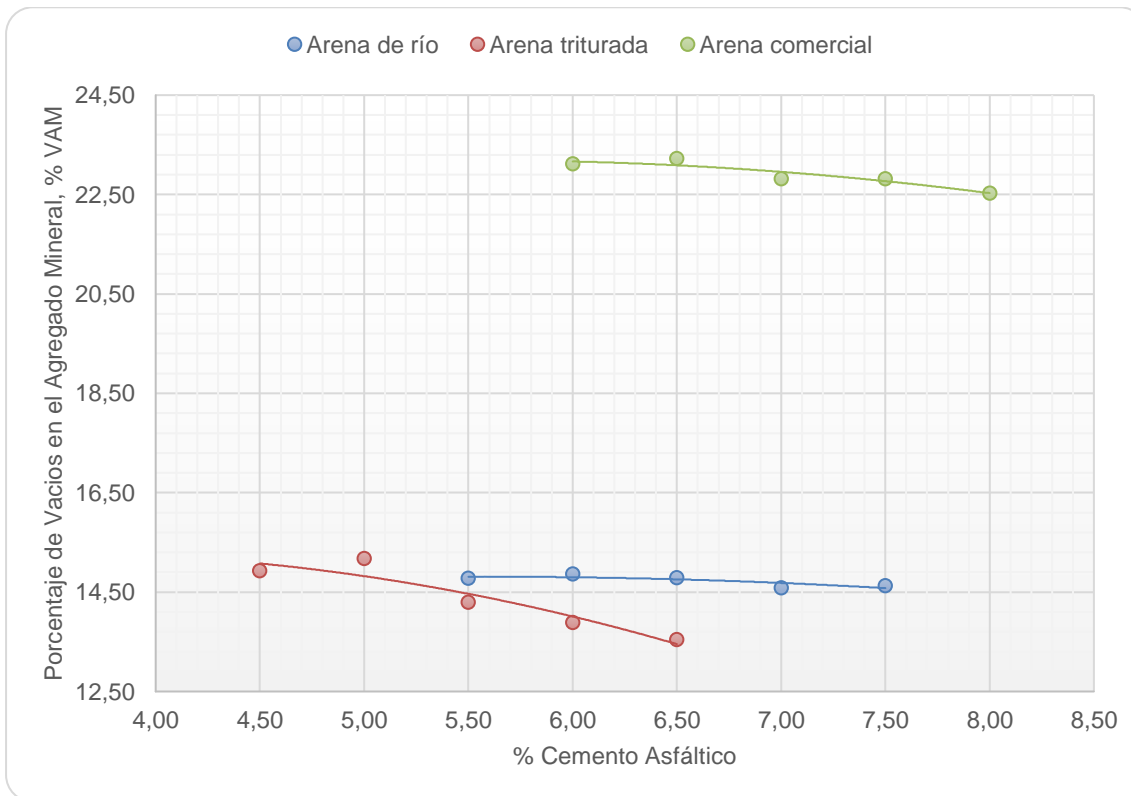
Así mismo, para la implementación de la arena de río, el porcentaje de vacíos se comprende en un rango de 8,24 % a 3,34 % cuando el porcentaje de cemento asfáltico está comprendido de 5,50 % a 7,50 % y para la arena comercial un rango de porcentaje de vacíos comprendido de 15,73 % a 10,27 % cuando el porcentaje aplicado de cemento asfáltico se encuentra entre 6,00 % a 8,00 %, indicando esto que la arena de río es apta también para su uso en un diseño de mezcla asfáltica, sin embargo, siendo esta menos manejable entre los rangos aceptables. Los datos de porcentaje de vacíos de la arena comercial se encuentran totalmente fuera de los rangos aceptables para su uso como material en un diseño de mezcla asfáltica, esto debido a su baja densidad, su peso y textura.

Tabla LI. Comparación de porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Probeta	% Bitumen	Arena de río % VAM	% Bitumen	Arena triturada % VAM	% Bitumen	Arena comercial % VAM
1	5,50	14,77	4,50	14,93	6,00	23,12
2	6,00	14,86	5,00	15,18	6,50	23,23
3	6,50	14,79	5,50	14,29	7,00	22,82
4	7,00	14,58	6,00	13,89	7,50	22,82
5	7,50	14,63	6,50	13,55	8,00	22,53

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos en el agregado mineral



Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos en agregado mineral

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, según gráficas comparativas, presenta una tendencia a disminuir al presentarse un incremento en la cantidad de cemento asfáltico.

Según el párrafo anterior, para el diseño de mezcla con la implementación de la arena triturada se presentan datos de vacíos en el agregado mineral que oscilan entre 15,18 % a 13,55 % para un porcentaje aplicado de cemento asfáltico de 4,5 % a 6,5 %. En el diseño de mezcla con arena de río se presenta una menor variación entre los datos de vacíos en el agregado mineral, siendo comprendidos estos entre 14,86 % a 14,58 %, esto debido a que el porcentaje de cemento asfáltico aplicado fue de 5,50 % a 7,50 %, mientras que en el diseño de mezcla con arena comercial el contenido de cemento asfáltico inicia de 6,00 % a 8,00 %, dando resultados de entre 23,23 % a 22,53 % de vacíos.

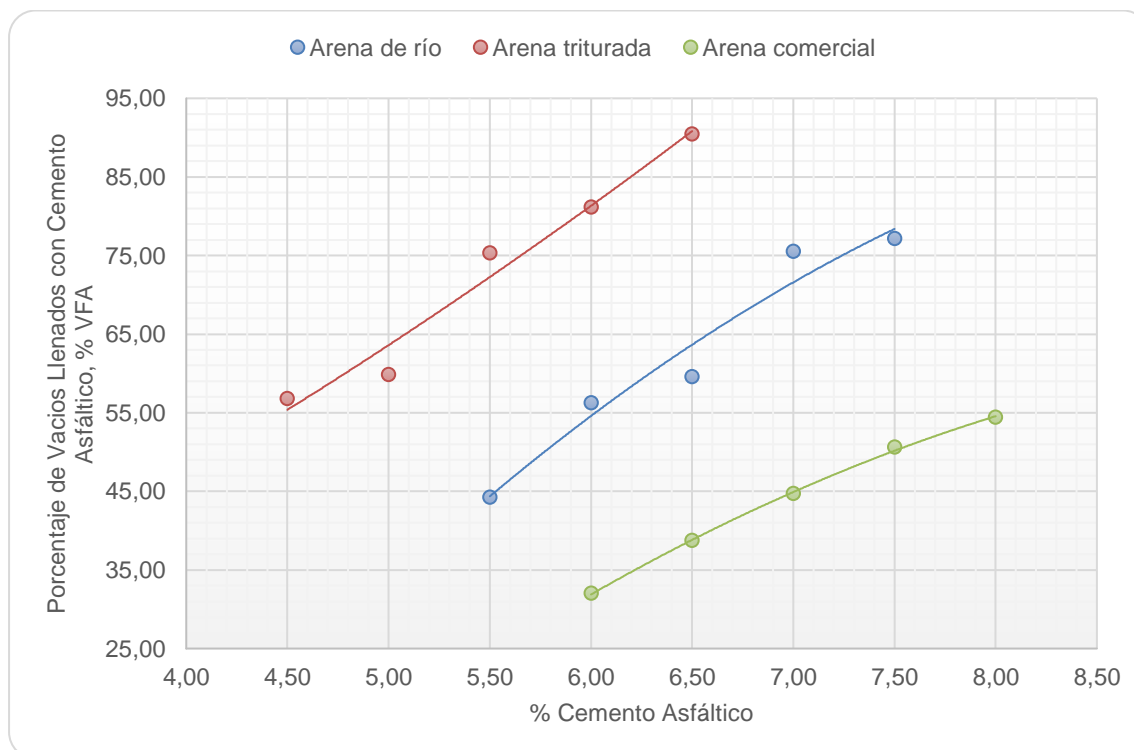
Al tomar en cuenta la estabilidad de los resultados en las propiedades volumétricas, se observa que la arena triturada mantiene un rango aceptable en el diseño de la mezcla asfáltica, la arena de río sigue un comportamiento un poco más alto, sin embargo, al utilizar esta con la granulometría correcta se vuelve totalmente manejable y apta para su aplicación como diseño de mezcla asfáltica. De nuevo la arena comercial queda lejos del rango aceptable para el VAM.

Tabla LII. **Comparación de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico**

Probeta	% Bitumen	Arena de río % VFA	% Bitumen	Arena triturada % VFA	% Bitumen	Arena comercial % VFA
1	5,50	44,22	4,50	56,78	6,00	31,97
2	6,00	56,25	5,00	59,78	6,50	38,72
3	6,50	59,51	5,50	75,30	7,00	44,68
4	7,00	75,46	6,00	81,11	7,50	50,58
5	7,50	77,14	6,50	90,44	8,00	54,39

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico**



Fuente: elaboración propia.

4.1.7. Diseño para granulometría en porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico

El porcentaje de vacíos llenados con cemento asfáltico tiene una relación directa a la cantidad de cemento asfáltico, cantidad de vacíos-densidad y vacíos en agregado mineral. La finalidad de este diseño es estabilizar la cantidad de vacíos existentes entre el agregado mineral y la mezcla asfáltica.

De acuerdo con los límites establecidos en la tabla 401-12 sobre requisitos para la mezcla de concreto asfáltico, los valores de vacíos llenados con cemento asfáltico, en porcentaje, deben estar comprendidos entre 65,00 % a 78,00 % de vacíos.

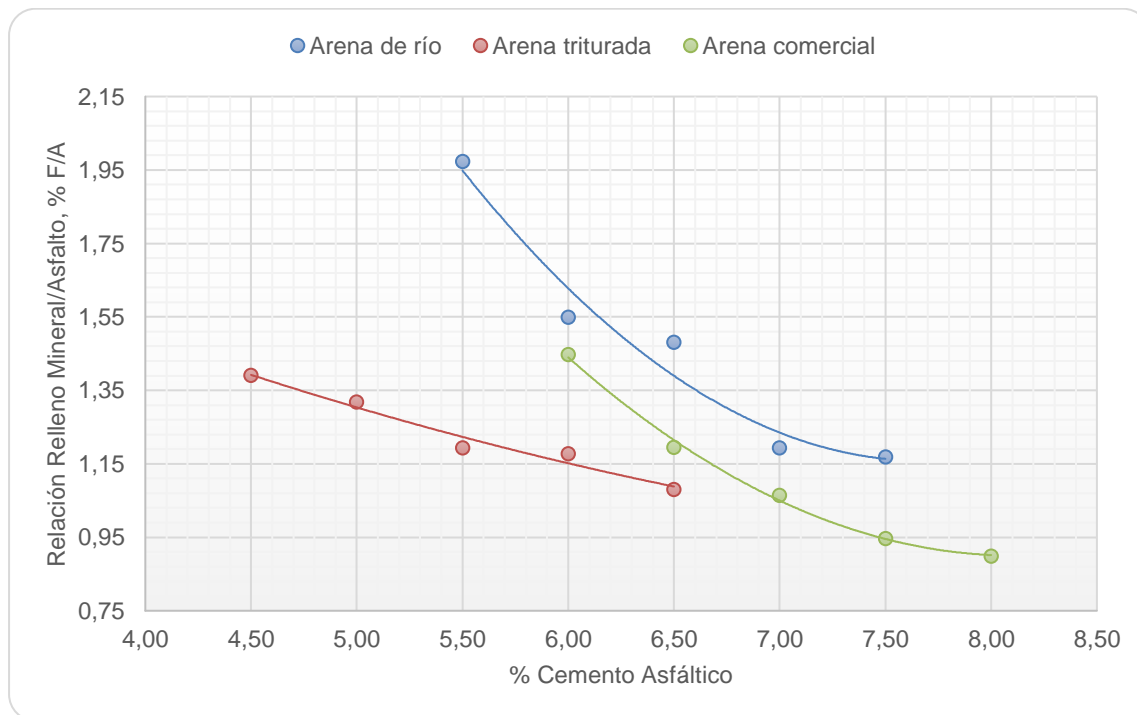
Particularmente, para el diseño de mezcla con la implementación de arena triturada con un porcentaje de cemento asfáltico de 6,50 % se presenta un VFA de 90,44 %. El VFA para la implementación de arena de río para un porcentaje de cemento asfáltico de 7,50 % es de 77,14 %. A diferencia de los dos diseños de mezcla mencionados anteriormente, el realizado con arena comercial presenta un VFA de 54,39 % con un porcentaje de cemento asfáltico de 8,00 %, lo cual indica que no cumple con los requisitos indicados y esto es a causa de la graduación de las partículas en este tipo de arena.

Tabla LIII. **Comparación de relación de relleno mineral/asfalto**

Probeta	% Bitumen	Arena de río % F/A	% Bitumen	Arena triturada % F/A	% Bitumen	Arena comercial % F/A
1	5,50	1,97	4,50	1,39	6,00	1,45
2	6,00	1,55	5,00	1,32	6,50	1,19
3	6,50	1,48	5,50	1,19	7,00	1,06
4	7,00	1,19	6,00	1,18	7,50	0,95
5	7,50	1,17	6,50	1,08	8,00	0,90

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica comparativa de relación de relleno mineral/asfalto**



Fuente: elaboración propia.

4.1.8. Diseño para granulometría en relación de relleno mineral/asfalto

De acuerdo con la tabla 401-12 sobre requisitos para la mezcla de concreto asfáltico, los valores de la relación relleno mineral/asfalto debe estar comprendido entre 0,60 % a 1,60 %. Según lo anterior mencionado la mayoría de los datos de porcentajes cumplen con los valores establecidos, a excepción cuando el dato de cemento asfáltico corresponde a 5,50 % para la aplicación de la arena de río, ya que la relación en este caso es de 1,97 %.

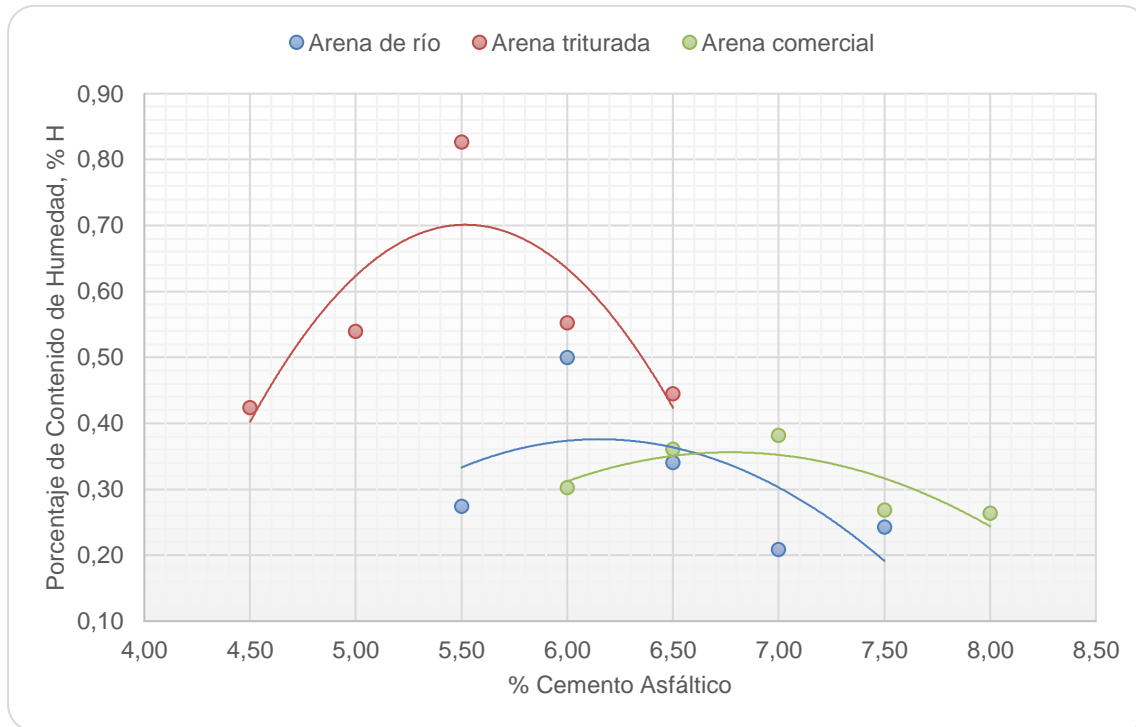
En relación con ello, se establece que el comportamiento de esta relación es inversamente proporcional al porcentaje de cemento asfáltico, con una tendencia hacia un porcentaje mínimo. De igual manera, se establece que los tres diseños de mezcla se encuentran dentro del rango aceptable, pero debido a que este parámetro se rige bajo el porcentaje de vacíos, se descarta la utilización de la arena comercial, debido a que no hay forma de mensurar el parámetro.

Tabla LIV. Comparación de porcentaje de contenido de humedad

Probeta	% Bitumen	Arena de río % H	% Bitumen	Arena triturada % H	% Bitumen	Arena comercial % H
1	5,50	0,27	4,50	0,42	6,00	0,30
2	6,00	0,50	5,00	0,54	6,50	0,36
3	6,50	0,34	5,50	0,83	7,00	0,38
4	7,00	0,21	6,00	0,55	7,50	0,27
5	7,50	0,24	6,50	0,44	8,00	0,26

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica comparativa de porcentaje de contenido de humedad**



Fuente: elaboración propia.

4.1.9. **Diseño para granulometría en porcentaje de contenido de humedad**

La tendencia del comportamiento para las tres gráficas es similar, ya que tienen una predisposición a aumentar para luego disminuir. Los datos para el diseño de mezcla con arena triturada presentan un valor máximo de contenido de humedad de 0,83 % cuando su contenido de cemento asfáltico corresponde a 5,50 %.

Para la implementación de arena de río se tienen datos con mayor variación con respecto a la tendencia, ya que se presenta un máximo

porcentaje de humedad de 0,50 % correspondiente a una cantidad de cemento asfáltico de, 6,00 %. La gráfica para la utilización de arena comercial presenta un valor máximo de humedad de 0,38 % cuando la cantidad de cemento asfáltico corresponde a 7,00 %.

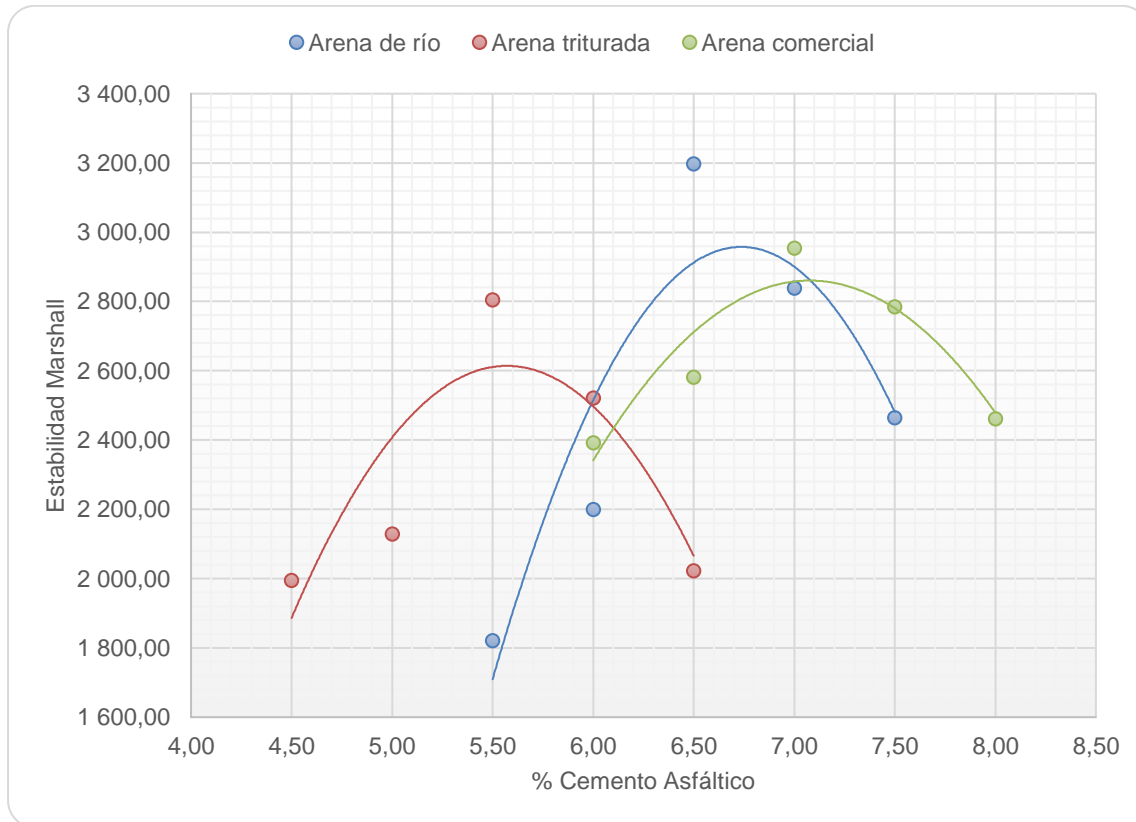
Debido a que la arena triturada presenta mayor cantidad de finos en su granulometría, esta es propensa a mantener mayor humedad en sus partículas, mientras que la arena de río es más propensa a perder su humedad debido a que no varía en forma sus partículas y la arena comercial, aunque mantiene una densidad baja, su estructura evapora fácilmente la humedad.

Tabla LV. **Comparación de estabilidad Marshall**

Probeta	% Bitumen	Arena de río Estabilidad	% Bitumen	Arena triturada Estabilidad	% Bitumen	Arena comercial Estabilidad
1	5,50	1 819,96	4,50	1 993,85	6,00	2 390,98
2	6,00	2 199,39	5,00	2 127,74	6,50	2 580,80
3	6,50	3 196,06	5,50	2 803,22	7,00	2 952,69
4	7,00	2 837,64	6,00	2 520,27	7,50	2 784,31
5	7,50	2 464,15	6,50	2 022,13	8,00	2 460,78

Fuente: elaboración propia.

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



Fuente: elaboración propia.

4.1.10. **Diseño para granulometría en estabilidad Marshall**

El comportamiento de las gráficas en este ensayo presenta una tendencia similar a la del contenido de humedad, es decir que las gráficas tienen un mínimo, un máximo y un óptimo, tienden a incrementar y disminuir en función del cemento asfáltico aplicado.

La estabilidad Marshall para la arena de río presenta un dato mínimo de 1 819,96 para un porcentaje de cemento asfáltico de 5,50 % y un máximo de

3 196,06 para un porcentaje de cemento asfáltico de 6,50 %. Para la implementación de la arena triturada el dato mínimo de estabilidad es de 1 993,85 para un porcentaje de cemento asfáltico de 4,50 % y un dato máximo de 2 803,22 para un porcentaje de 5,50 % de cemento asfáltico. Por último, para la arena comercial se obtuvo un dato mínimo de estabilidad de 2 390,98 para un porcentaje de cemento asfáltico de 6,00 % y un máximo de 2 952,69 para un porcentaje de cemento asfáltico de 7,00 %.

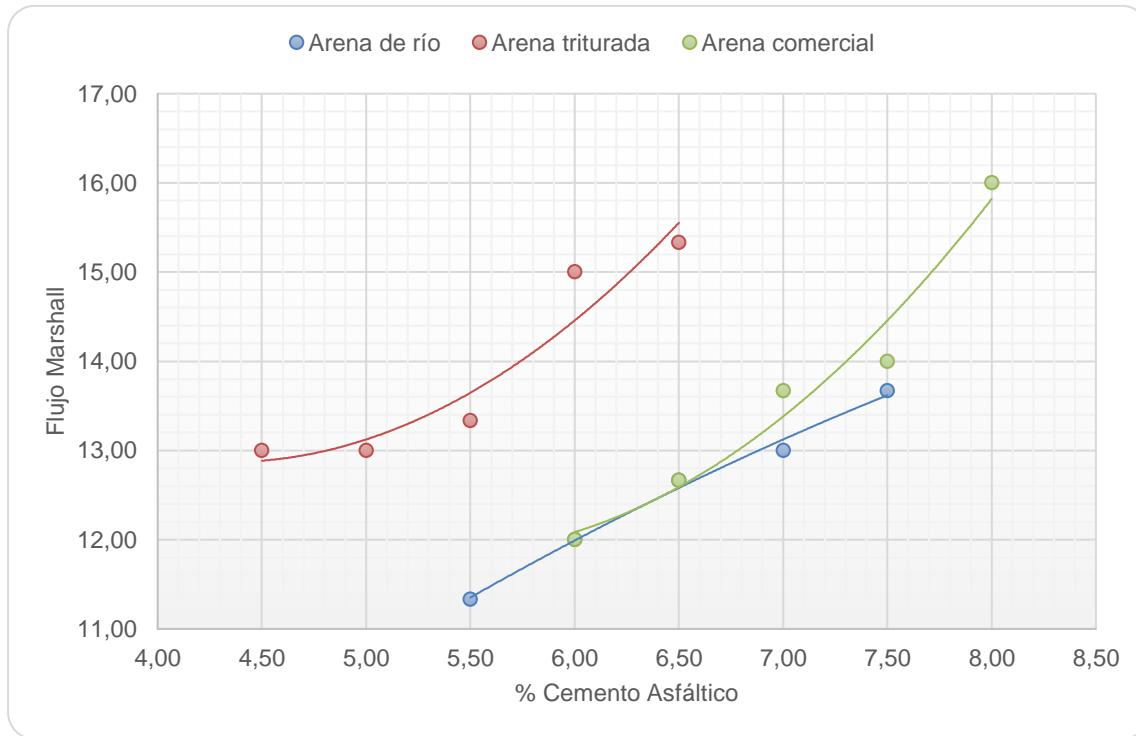
Se puede apreciar que la gráfica del diseño de mezcla con arena triturada presenta datos de estabilidad menores a las otras dos gráficas, sin embargo, esto se da debido a que la variación de carga es independiente al mejor comportamiento volumétrico del diseño, ya que la arena de río y comercial, al compactarse, tritura el agregado fino, elevando así el contenido de cemento asfáltico a utilizar, y así mismo aumentando en conjunto la resistencia a la carga de las mezclas asfálticas. Como se observa, la gráfica de la arena triturada presenta un comportamiento estable con la aplicación de menos cemento asfáltico.

Tabla LVI. **Comparación de flujo Marshall**

Probeta	% Bitumen	Arena de río Flujo	% Bitumen	Arena triturada flujo	% Bitumen	Arena comercial flujo
1	5,50	11,33	4,50	13,00	6,00	12,00
2	6,00	12,00	5,00	13,00	6,50	12,67
3	6,50	12,67	5,50	13,33	7,00	13,67
4	7,00	13,00	6,00	15,00	7,50	14,00
5	7,50	13,67	6,50	15,33	8,00	16,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Gráfica comparativa de flujo Marshall



Fuente: elaboración propia.

4.1.11. Diseño para granulometría en flujo Marshall

La tendencia del comportamiento de las gráficas correspondientes al flujo Marshall para la aplicación de los tres tipos de arena en cuestión es su aumento proporcional al porcentaje de cemento asfáltico. Los valores del flujo Marshall para el diseño con arena de río inician desde 11,33 hasta 13,67 con porcentajes de 5,50 % hasta 7,50 %, respectivamente. Así mismo, los datos de flujo para la arena triturada y comercial se ven en aumento desde 13,00 hasta 15,33 (arena triturada) y de 12,00 hasta 16,00 (arena comercial) con datos de porcentaje de cemento asfáltico de 4,50 % a 6,50 % y de 6,00 % a 8,00 %, respectivamente.

Contrario a las propiedades volumétricas, la estabilidad y flujo Marshall hacen ver que las tres gráficas tienen un buen comportamiento, el flujo es la propiedad de la mezcla asfáltica a deformarse bajo carga y en este caso los tres tipos de arena cumplen con los rangos de deformación, por eso es que el diseño no se basa en estos dos aspectos (carga y deformación), debido a que estas propiedades se cumplen aun con materiales de mala calidad, y se basa directamente en el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.

Nota: Los informes de los ensayos realizados en el Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, correspondientes a la Orden de Trabajo No. 40854, se adjuntan en fase de borrador en los anexos del presente trabajo de graduación. Los informes finales no fueron presentados debido a causas de fuerza mayor.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades físicomecánicas de una mezcla asfáltica en caliente dependen directamente de los materiales constituyentes de la misma, como los materiales pétreos y cemento asfáltico. En características del agregado fino, las propiedades de la mezcla asfáltica varían según la caracterización física, caracterización mineralógica y procedencia geológica del agregado implementado para cada uno de los diseños de mezcla.
2. El cemento asfáltico utilizado fue AC-20 para cada uno de los diseños de mezcla, de igual manera se utilizó el mismo agregado grueso, por lo cual la caracterización principal y la variación de los resultados se debe al agregado fino utilizado. Estos agregados marcan diferencia en el diseño granulométrico y el porcentaje de cemento asfáltico requerido en cada uno de los diseños de mezcla realizados.
3. Las propiedades volumétricas en los diseños de mezcla se ven modificadas directamente por el tipo de agregado fino, debido a la granulometría que cada una de ellas presenta en función del peso de sus partículas. Es por ello que el tipo de granulometría a utilizar es de suma importancia y debe analizarse cuidadosamente, así como el cemento asfáltico a implementar según sus propiedades de viscosidad.
4. La cantidad de cemento asfáltico difiere en los tres diseños, esto se debe a que el área superficial de cada agregado cambia, además de que diferentes agregados tendrán un porcentaje de absorción del bitumen

distinto. Otro de los factores que se involucran en el cambio del porcentaje óptimo del bitumen es la forma de las partículas del agregado, pues en los tres agregados utilizados las aristas y formas también cambian. Las arenas trituradas poseen mejores características de forma, mientras que la arena de río muestra partículas redondeadas que disminuyen la resistencia al corte dentro de la mezcla asfáltica. La arena comercial que posee un alto contenido de pómez se desintegra al compactarse, teniendo la mayor demanda de bitumen al generar mayor cantidad de finos.

5. La cantidad de bitumen y el agregado utilizado tienen un impacto directo en la carga y deformación de la mezcla asfáltica. Aunque el diseño sea el adecuado en proporción al cemento asfáltico, las características varían, es decir, al aumentar el bitumen se gana resistencia, pero se aumenta la deformación, esto hace que la arena comercial tenga resultados más elevados en deformación, mientras que la arena triturada da mejores resultados para el diseño de la mezcla asfáltica.

6. La cantidad de bitumen a aplicar óptimamente se establece mediante el análisis de la gráfica comparativa del porcentaje de vacíos-densidad, en la cual se establece el rango aceptable de vacíos de un porcentaje de 3 % a 5 %. En este caso se utilizó un valor promedio del porcentaje aplicando para ello 4 % y obteniendo un porcentaje de cemento asfáltico de 5,50 % como óptimo para el diseño realizado con la arena triturada, un porcentaje óptimo de bitumen de 7,00 % para el diseño con arena de río. Para el diseño de mezcla con arena comercial no se encuentra un dato con el 4 % de vacíos, ya que todos se encuentran por encima del mismo, lo cual indica que este rango no es óptimo para este diseño. La arena con las propiedades y características más adecuadas para su

implementación en un diseño de mezcla asfáltica es la arena triturada, por su granulometría, forma de partículas y optimización del cemento asfáltico aplicado.

7. El porcentaje de vacíos en el agregado mineral es un determinante de la graduación de las partículas de los agregados pétreos implementados, por lo cual fue de vital importancia para el correcto análisis de los resultados en el presente trabajo de graduación. Según los datos obtenidos, la arena triturada y de río oscilan cerca del porcentaje óptimo de 14,00 %, obtenido según el tamaño máximo nominal, y con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico se obtiene un dato permisible para su utilización en una mezcla asfáltica. Al contrario del diseño de mezcla realizado con arena comercial, cuyos datos se presentan totalmente fuera de los límites permisibles, debido a su granulometría y a la forma de sus partículas.

8. Las condiciones de temperatura y humedad que se presentan en una mezcla asfáltica afectan de una manera directa las características y propiedades físicomecánicas. La humedad en el diseño de mezcla debe tener el menor valor posible dentro de los estándares, ya que en una estructura asfáltica entre las principales causas de deterioro en servicio se encuentra el daño por humedad, debido a que la presencia de agua hace que el ligante asfáltico se separe del agregado pétreo, ocasionando contracción entre los diferentes componentes, agrietamiento y esfuerzos de tensión dentro de la estructura. Es de vital importancia el estudio minucioso del porcentaje de humedad en un diseño de mezcla, ya que se ven involucrados aspectos físicos, químicos, mecánicos y termodinámicos. De los tres tipos de arenas analizadas, la arena

comercial es la que presenta una mayor retención de humedad debido a la porosidad y granulometría que presentan sus partículas.

RECOMENDACIONES

1. Analizar los diferentes tipos de agregados a utilizar en una mezcla asfáltica, mayormente en el agregado fino, debido al porcentaje en peso que este representa del diseño total y de la incidencia directa que tiene en las propiedades físicas, mecánicas y volumétricas.
2. Utilizar agregados finos de alta densidad, ya que esto disminuye el volumen de la mezcla asfáltica y con ello la cantidad de cemento asfáltico a utilizar, así mismo aumenta la resistencia de la mezcla.
3. Realizar, si para un diseño de mezcla se utilizará arena de río, análisis de control de calidad para todas sus características y propiedades para obtener la mejor calidad posible y establecer si es posible su implementación en campo.
4. Calibrar adecuadamente los dispositivos, equipos y herramientas utilizados en los distintos ensayos de laboratorio, y cuidar que estén en buen estado para evitar errores en la toma de datos.
5. Conocer las propiedades reológicas del cemento asfáltico para determinar la temperatura adecuada de mezclado y compactación de las muestras, evitando con esto la oxidación de la mezcla asfáltica y optimizando la densidad al momento de compactar.
6. Mantener la graduación granulométrica para cada uno de los diseños y así poder establecer de mejor manera una comparación más acertada

por cada uno de los componentes o específicamente del componente en estudio.

7. Elaborar tres probetas por cada variación de contenido de cemento asfáltico en el diseño de mezcla y realizar un promedio de los datos obtenidos, esto debido a que la mezcla no es totalmente homogénea en su producción y al realizarlo de esta manera se asegura que los ensayos realizados en laboratorio tengan una mayor confiabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

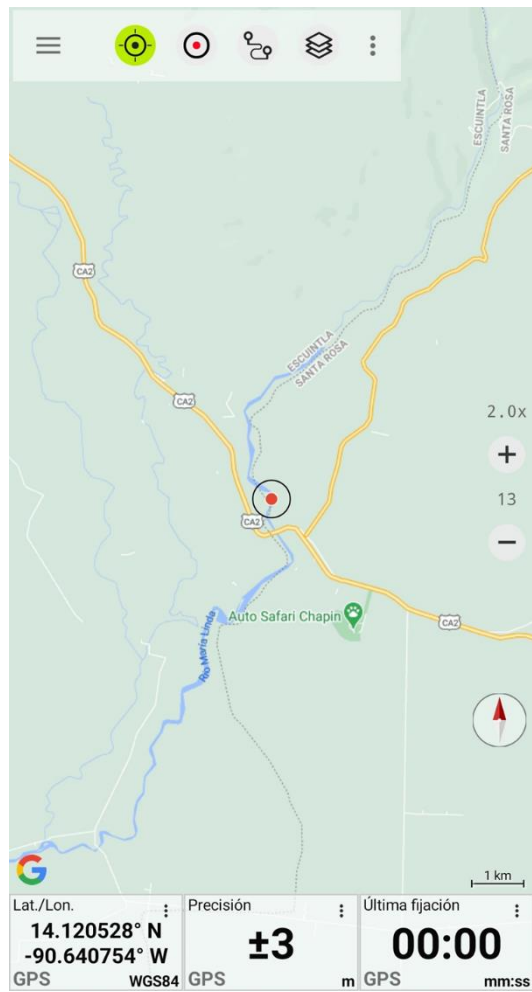
1. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Fine aggregate for bituminous paving mixtures. AASHTO M 29*. New York, United States: AASHTO, 2003. 3 p.
2. American Society for Testing and Materials. *Hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures. ASTM D 3515*. New York, United States: ASTM, 2005. 5 p.
3. _____. *Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus. ASTM D 6926*. New York, United States: ASTM, 2016. 9 p.
4. _____. *Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures. ASTM D 6927*. New York, United States: ASTM, 2015. 10 p.
5. _____. *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. ASTM D 2041*. New York, United States: ASTM, 2003. 8 p.
6. Anonymous. *El cemento asfáltico*. [en línea]. <<http://elcementoasfaltico.blogspot.com/>>. [Consulta: 10 de junio de 2020].

7. ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. Madrid, España: Autor, 2018. 304 p.
8. Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de Manuales No. 22 (MS-22)*. Miami, Estados Unidos: Autor, 1992. 275 p.
9. Cámara Guatemalteca de la Construcción. *Control de calidad para mezclas asfálticas*. Ciudad de Guatemala: Autor, 2016. 139 p.
10. Comisión Guatemalteca de Normas. *COGUANOR NTG 41010 h1. Método de ensayo. Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Economía, 2016. 17 p.
11. _____. *COGUANOR NTG 51005 h34. Método de ensayo para estabilidad y flujo Marshall de mezclas asfálticas*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Economía, 2019. 17 p.
12. _____. *COGUANOR NTG 51005 h21. Método de preparación de muestras de mezcla asfáltica utilizando el aparato Marshall*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Economía, 2019. 15 p.
13. Construmática. *Emulsiones bituminosas*. [en línea]. <https://www.construmatica.com/construpedia/Emulsiones_Bituminosas>. [Consulta: 16 de junio de 2020].

14. CUCHILLO CAYTUIRO, Olga Zarepta. *Material asfáltico*. [en línea]. <<https://civilgeeks.com/2015/06/16/material-asfaltico/>>. [Consulta: 14 de mayo de 2020].
15. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ciudad de Guatemala: Gobierno de Guatemala, 2002. 22 p.
16. E-Asphalt. *Historia del asfalto*. [en línea]. <http://www.e-asfalto.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm>. [Consulta: 15 de mayo de 2020].
17. EcuRed. *Asfalto*. [en línea]. <<https://www.ecured.cu/Asfalto>>. [Consulta: 14 de mayo de 2020].
18. The Asphalt Institute. *Manual del asfalto*. Maryland, Estados Unidos: Autor, 1965. 477 p.

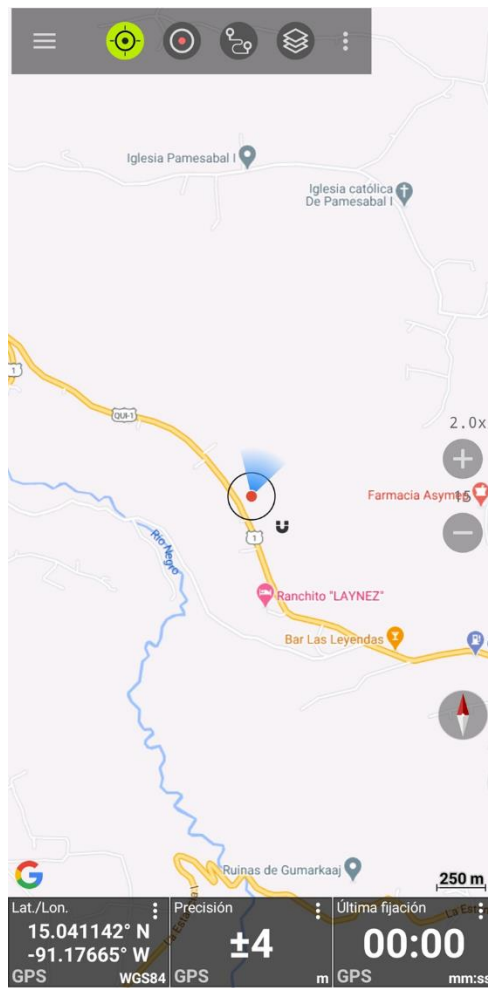
APÉNDICES

Apéndice 1. Coordenadas de obtención de muestras de arena de río



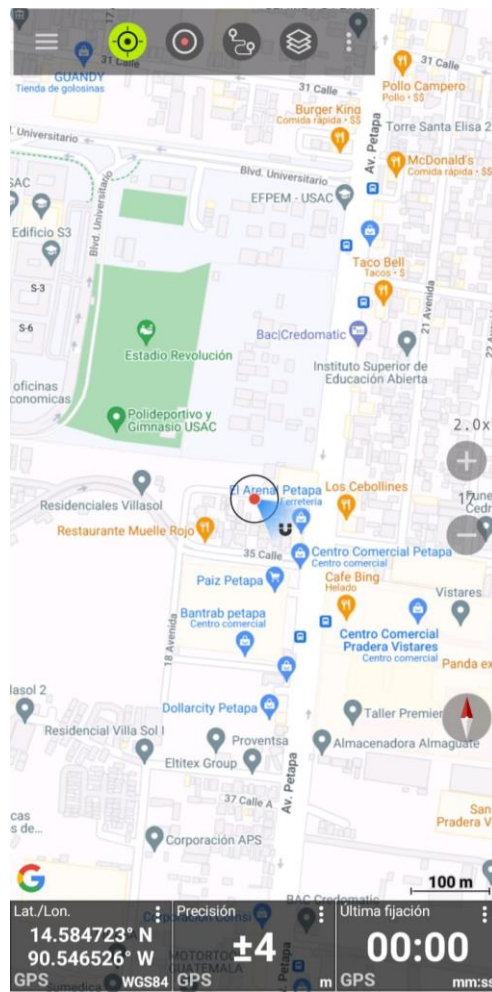
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Coordenadas de obtención de muestras de arena triturada**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Coordenadas de obtención de muestras de arena comercial**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Secado de pedrín y arena



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 5. Equipo utilizado para el tamizado de los agregados



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 6. Limpieza de moldes para briquetas



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 7. **Equipo utilizado para calentar agregados, cemento
asfáltico y mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 8. **Equipo utilizado para compactación de briquetas**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 9. **Ensayo de gravedad específica *Bulk***



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 10. **Ensayo de gravedad específica teórica máxima *Rice***



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 11. Ensayo Marshall



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de densidad específica *Bulk* (ASTM 2726-05a)

INFORME NUMERO: 044 S.S.A. ORDEN DE TRABAJO: 40854
INTERESADO: CARLOS ANDRÉ ABAD HURTARTE
PROYECTO: TESIS: ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL
UBICACIÓN: 31 CALLE 6-72, ZONA 11, COLONAI GRANAI & TOWNSON 1
ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a
FECHA: 09 DE MAYO DEL 2022
MUESTRA: ARENA DE RIO, COMERCIAL Y TRITURADA BRIQUETAS
OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

PROBETA	ARENA TRITURADA Gmb	ARENA RÍO Gmb	ARENA COMERCIAL Gmb
1	2.278	2.328	1.943
2	2.283	2.321	1.943
3	2.280	2.323	1.936
4	2.256	2.310	1.936
5	2.276	2.311	1.929
6	2.270	2.318	1.904
7	2.269	2.308	1.916
8	2.274	2.301	1.918
9	2.253	2.276	1.903
10	2.251	2.273	1.869
11	2.245	2.261	1.886
12	2.272	2.308	1.921
13	2.264	2.258	1.858
14	2.246	2.281	1.898
15	2.253	2.274	1.899

Atentamente,

Vo.Bo.:

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Fuente: Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Anexo 2. **Informe de densidad específica teórica máxima *Rice* (ASTM 2041)**

INFORME NUMERO: 047 S.S.A. **ORDEN DE TRABAJO:** 40854
INTERESADO: CARLOS ANDRÉ ABAD HURTARTE
PROYECTO: TESIS: ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL
UBICACIÓN: 31 CALLE 6-72, ZONA 11, COLONIA GRANAI & TOWNSON 1
ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041
FECHA: 09 DE MAYO DEL 2022
MUESTRA: ARENA DE RIO, COMERCIAL Y TRITURADA BRIQUETAS
OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

PROBETA	ARENA TRITURADA		ARENA RÍO		ARENA COMERCIAL	
	Gmm	% vacios	Gmm	% vacios	Gmm	% vacios
1	2.340	2.530	2.405	3.343	2.163	10.275
2	2.352	3.624	2.399	3.578	2.167	11.276
3	2.345	3.404	2.441	5.987	2.189	12.622
4	2.359	4.356	2.439	6.503	2.206	14.232
5	2.360	4.488	2.475	8.239	2.237	15.728

Atentamente,

Vo.Bo.:

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
FE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Fuente: Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Anexo 4. **Informe de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D 6927-15)**

INFORME NUMERO: 045 S.S.A. **ORDEN DE TRABAJO:** 40854
INTERESADO: CARLOS ANDRÉ ABAD HURTARTE
PROYECTO: TESIS: ALTERNATIVA DE USO DE ARENA TRITURADA, ARENA DE RÍO Y ARENA COMERCIAL

UBICACIÓN: 31 CALLE 6-72, ZONA 11, COLONAI GRANAI & TOWNSON 1
ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 6927-15
FECHA: 09 DE MAYO DEL 2022
MUESTRA: ARENA DE RIO, COMERCIAL Y TRITURADA BRIQUETAS
OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

PROBETA	ARENA TRITURADA		ARENA RÍO		ARENA COMERCIAL	
	lbf	0.0"	lbf	0.01"	lbf	0.01"
1	2178.680	14	2901.421	11	2493.834	19
2	1926.334	16	2184.316	15	2409.940	15
3	1961.361	16	2306.720	15	2478.580	14
4	2241.568	15	2918.740	12	2930.532	12
5	2661.889	14	2918.740	14	2730.262	16
6	2657.366	16	2675.444	13	2692.129	14
7	2991.811	13	3515.314	13	2946.162	11
8	2407.948	12	3154.133	10	3011.042	15
9	3009.889	15	2918.740	15	2900.878	15
10	2180.276	11	2042.709	13	2341.300	12
11	1768.716	12	2042.709	12	2914.901	14
12	2434.217	16	2512.740	11	2486.207	12
13	1944.041	15	1986.586	10	2643.830	11
14	2110.223	13	1835.935	13	2132.372	13
15	1927.281	11	1637.367	11	2396.752	12

Atentamente,

Vo.Bo.:

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Fuente: Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Anexo 5. Tabla Humboldt Mfg. Co. corrección de estabilidad Marshall

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

4 SEP 20

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

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

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

Anexo 6. **Tabla de factores de corrección de estabilidad Marshall**

CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD					
Volumen de la briqueta cm³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección	Volumen de la briqueta cm³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56	406-420	5.08	1.47
214-225	2.70	5.00	421-431	5.24	1.39
226-237	2.86	4.55	432-443	5.40	1.32
238-250	3.02	4.17	444-456	5.56	1.25
251-264	3.17	3.85	457-470	5.71	1.19
2.65-276	3.33	3.57	471-482	5.87	1.14
277-289	3.49	3.33	483-495	6.03	1.09
290-301	3.65	3.03	496-508	6.19	1.04
302-316	3.81	2.78	509-522	6.35	1.00
317-328	3.97	2.50	523-535	6.51	0.96
329-340	4.13	2.27	536-546	6.67	0.93
341-353	4.29	2.08	547-559	6.82	0.89
354-367	4.44	1.92	560-573	6.98	0.86
368-379	4.60	1.79	574-585	7.14	0.83
390-392	4.76	1.67	586-598	7.30	0.81
393-405	4.92	1.56	599-610	7.46	0.78
			611-625	7.62	0.76

Fuente: ASTM. D 1559. *Diseño de mezclas método Marshall e interpretación de resultados.*

p. 6.

Anexo 7. Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico

Tabla 401 -12 Requisitos para la Mezcla de Concreto Asfáltico

METODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) MARSHALL (AASHTO T 245)		
• Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
• Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾	75	75
• Estabilidad	5,338 N (1,200 libras)	
• Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.)		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
• Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	275
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
• Relación finos/bitumen ⁽⁴⁾	0.6	1.6
• Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283		
Resistencia retenida	80 %	
• Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95 %	

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

Anexo 8. Vacíos en el agregado mineral

Tabla 401-13 Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

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

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

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