



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

**DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE
CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD**

Amadeo José García Avila

Asesorado por la Inga. Martha Dina Avellán Cruz

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE
CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

AMADEO JOSÉ GARCÍA AVILA

ASESORADO POR LA INGA. MARTHA DINA AVELLÁN CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Walter Rolando Salazar González
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
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:

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha octubre del 2013.



Amadeo José García Avila



Tecnología
Experiencia
Calidad

Guatemala, 29 de septiembre de 2015

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

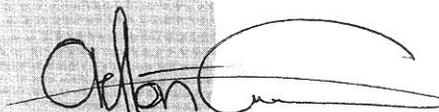
Estimado Ing. Ordóñez:

De manera atenta me dirijo a usted, deseándole éxitos en sus labores cotidianas.

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que el estudiante **Amadeo José García Ávila**, quien se identifica con carnet No. **200819397**, desarrolló el trabajo de graduación titulado **"DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"**. Personalmente le he orientado en el desarrollo del informe final y por esta razón extiendo la presente, para manifestarle que estoy de acuerdo con el referido trabajo, aprobando el mismo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Civil Martha Dina Avellán Cruz
Gerente de Control de Calidad
ASFALGUA

Ing. Dina Avellán Cruz
INGENIERA CIVIL OOL. 8658



ASFALTOS DE GUATEMALA, S.A.
PBX 2463-3500
11 Avenida 38-60 Zona 11
Las Charcas, Guatemala 014011
www.asfalgua.com
Nit: 33154-6



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
23 de octubre de 2015

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEÍTE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Amadeo José García Ávila, quien contó con la asesoría de la Inga. Martha Dina Avellán Cruz.

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 ENSEÑADA A TODOS


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



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Martha Dina Avellán Cruz y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez, al trabajo de graduación del estudiante Amadeo José García Avila, titulado DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

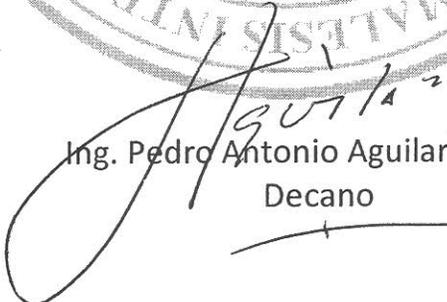




DTG. 607.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD**, presentado por el estudiante universitario: **Amadeo José García Avila**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2015

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones derramadas en mi vida, su inmenso amor al permitirme el calor de mi familia y por ser la guía de mi camino.
- Mis padres** José Francisco García Arévalo y Claudina Celeste Ávila Herrarte, por su apoyo incondicional durante cada etapa de mi carrera universitaria.
- Mis hermanos** Jacobo Ariel, Sara Iris y María Isabel García Ávila.
- Mis abuelos** Isaac Amadeo García Zepeda, Claudio Bernardo Ávila Godoy, por ser ejemplo de vida, como hombres trabajadores y responsables.
- Mis abuelas** María del Carmen Arévalo Morales y Paula Herrarte Miranda, por su cariño y buenos consejos.

Mi familia

En especial a mis tíos, Eugenia García, Yuri García y Mirtala García de Trabanino, por todo el apoyo brindado.

Mis amigos

A todos y cada uno de ellos, por el apoyo y convivencias que me brindaron a lo largo de la carrera y de todos los años de conocerlos.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por todas las bendiciones derramadas en mi vida, su inmenso amor al permitirme el calor de mi familia y por ser la guía de mi camino.
Mis padres	José Francisco García Arévalo y Claudina Celeste Ávila Herrarte, por el cariño y esfuerzo que me han brindado durante toda mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme las herramientas necesarias para desarrollarme como profesional en el campo.
Facultad de Ingeniería	Por bríndame los conocimientos necesarios para desarrollarme como ingeniero.
Asfaltos de Guatemala, S. A.	En especial al Ing. José Agüero Umattino, por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación en tan prestigiosa empresa, así como todo el apoyo y conocimientos brindados, a la Inga. Dina Avellán, por su paciencia y tiempo dedicado en asesorarme durante la elaboración del presente trabajo de graduación, a Luis Castillo, Eusguar Pérez, Julio Guamuch y William Alvarez, por su apoyo en el laboratorio de Asfalga.

**Ing. Jesús Augusto
García Ibáñez**

Por todo el apoyo brindado durante los últimos años de mi carrera universitaria y por ser un ejemplo a seguir en el ámbito profesional.

**Compañía Constructora
de Obras Civiles, S. A.**

En especial al Ing. Jesús Augusto García Ibáñez, al Ing. Rafael Díaz Samos y Rafael Diaz Fion, por darme la oportunidad de formar parte de tan prestigiosa empresa, donde he podido adquirir muchos conocimientos en el área de la construcción; al Ing. Rudy Chután, por su apoyo durante la etapa final de mi carrera universitaria y por compartir sus conocimientos profesionales de manera incondicional.

Naturaceites, S. A.

Por su apoyo al brindar información sobre el cultivo de palma en el país y por proporcionar las muestras de aceite crudo de palma africana utilizadas en el desarrollo de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ASFALTO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción.....	1
1.3. Características físicas del asfalto de pavimentación	2
1.3.1. Durabilidad.....	2
1.3.2. Adhesión y cohesión.....	3
1.3.3. Susceptibilidad a la temperatura.....	3
1.3.4. Envejecimiento y endurecimiento	4
1.3.5. Pureza	5
1.4. Especificaciones sobre los cementos asfálticos	5
1.4.1. Caracterización por viscosidad	6
1.4.2. Caracterización por penetración	9
1.4.3. Caracterización por grado de desempeño según especificación SuperPave	11
1.4.4. Procedimientos de ensayos SuperPave	15
2. MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA	25
2.1. Antecedentes.....	25

2.2.	Descripción	26
2.3.	Beneficios de la mezcla asfáltica tibia	27
2.3.1.	Reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO ₂)	27
2.3.2.	Exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y extensión de la mezcla.....	28
2.3.3.	Reducción en el consumo de energía para producir la mezcla	29
2.3.4.	Mejoras en la colocación y compactación de la mezcla.....	29
2.3.5.	Incremento en las distancias de acarreo.....	30
2.4.	Métodos para producir mezclas tibias	31
2.4.1.	Sistema mediante el uso de aditivos	31
2.4.1.1.	Sasobit	31
2.4.1.2.	Licomont.....	32
2.4.1.3.	Aditivos orgánicos	33
2.4.1.3.1.	Aceite crudo de palma africana	33
2.4.2.	Sistemas a base de espuma	34
2.4.2.1.	Zeolita.....	34
2.4.2.2.	Sistema <i>low energy asphalt</i>	35
2.4.2.3.	Planta de doble tambor	36
2.4.3.	Sistemas a base de emulsión.....	36
3.	ACEITE CRUDO DE PALMA.....	39
3.1.	Descripción	39
3.2.	Usos del aceite de palma	42
3.2.1.	Culinarios	42
3.2.2.	Industriales	42

3.3.	Características del aceite crudo de palma proveniente de la extractora Pataxte	43
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
4.1.	Caracterización del asfalto base.....	45
4.2.	Modificación de asfalto con aceite crudo de palma	47
4.2.1.	Dosificaciones utilizadas.....	48
4.2.2.	Construcción de curvas viscosidad <i>versus</i> temperatura	54
4.2.3.	Determinación de temperaturas de mezclado y compactación.....	62
4.2.4.	Determinación de contenido de aceite de palma a utilizar	63
4.3.	Caracterización de los agregados minerales para una mezcla de graduación D (19 mm).....	63
4.3.1.	Agregado grueso	64
4.3.2.	Agregado medio	65
4.3.3.	Agregado fino	66
4.3.4.	Combinación de agregados.....	67
4.4.	Diseño de mezcla según método Marshall.....	67
4.4.1.	Mezcla patrón con asfalto convencional	68
4.4.1.1.	Gravedad específica bruta de la mezcla (Gmb).....	69
4.4.1.2.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm)	70
4.4.1.3.	Porcentaje de vacíos de aire (Va).....	71
4.4.1.4.	Porcentaje de asfalto absorbido (Pba).....	72
4.4.1.5.	Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe)....	73

4.4.1.6.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	74
4.4.1.7.	Porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA)	75
4.4.1.8.	Estabilidad Marshall	76
4.4.1.9.	Fluencia Marshall	78
4.4.1.10.	Relación estabilidad/fluencia (REF)	78
4.4.1.11.	Relación Filler/ Betún (F/B)	79
4.4.1.12.	Selección del porcentaje óptimo de asfalto.....	80
4.4.2.	Mezcla con asfalto modificado con aceite de palma.....	93
4.4.2.1.	Mezcla patrón con 4,70 % de asfalto sin modificar	94
4.4.2.2.	Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma.....	94
4.4.2.3.	Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma.....	95
4.4.2.4.	Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma.....	96
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
5.1.	Comparación de resultados de pruebas de desempeño en laboratorio	99
5.2.	Análisis e interpretación de resultados.....	100

CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica consistencia <i>versus</i> temperatura en el asfalto	4
2.	Viscosímetro capilar	6
3.	Gráfica de la susceptibilidad a la temperatura en un asfalto	8
4.	Ensayo de penetración.....	10
5.	Gráfica de la consistencia de tres asfaltos diferentes	12
6.	Tabla de requisitos de la especificación SuperPave	14
7.	Funcionamiento del reómetro de corte dinámico	16
8.	Comportamiento de un material viscoelástico	17
9.	Viscosímetro Brookfield.....	18
10.	Reómetro de viga a flexión.....	19
11.	Gráfica rigidez <i>versus</i> tiempo.....	20
12.	Ensayo de tracción directa	21
13.	Horno rotatorio de película delgada	22
14.	Cámara de envejecimiento a presión	24
15.	Clasificación de mezclas asfálticas según temperatura	26
16.	Reducción de emisiones registradas en la mezcla asfáltica tibia	28
17.	Colocación de mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia	29
18.	Compactación de mezcla asfáltica tibia	30
19.	Aspecto visual del aditivo Sasobit	32
20.	Aspecto visual del aditivo Licomont BS 100 en granos	33
21.	Aspecto visual del aditivo Aspha-min	34
22.	Sistema Low Energy Asphalt	35
23.	Planta de doble tambor, Astec Double-Green Barrel	36

24.	Planta de doble tambor, Astec Double-Green Barrel	37
25.	Aceite crudo de palma	39
26.	Cultivo de palma africana	40
27.	Fruto de palma africana	41
28.	Características del aceite de palma africana	43
29.	Carta reológica asfalto base AC-20	46
30.	Gravedad específica del asfalto <i>versus</i> porcentaje de aceite de palma	49
31.	Penetración <i>versus</i> porcentaje de aceite de palma	50
32.	Viscosidad cinemática a 135 °C <i>versus</i> porcentaje de aceite de palma	51
33.	Viscosidad cinemática a 165 °C <i>versus</i> porcentaje de aceite de palma	52
34.	Punto de ablandamiento en °C <i>versus</i> porcentaje de aceite de palma	53
35.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 sin modificar	55
36.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 0,5 % de aceite de palma	56
37.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 1,0 % de aceite de palma	57
38.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 1,5 % de aceite de palma	58
39.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 2,0 % de aceite de palma	59
40.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 2,5 % de aceite de palma	60
41.	Gráfica de viscosidad <i>versus</i> temperatura de asfalto AC-20 modificado con 3,0 % de aceite de palma	61

42.	Graduaciones designadas para cada tipo de mezcla según la Dirección General de Caminos	64
43.	Probetas utilizadas para diseño de mezclas por método Marshall.....	68
44.	Prensa de estabilidad Marshall	77
45.	Gráfico vacíos de aire (Va) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	81
46.	Gráfico vacíos en el agregado mineral (VMA) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	84
47.	Gráfico vacíos llenados con asfalto (VFA) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	85
48.	Gráfico porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	86
49.	Gráfico estabilidad Marshall (E) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	87
50.	Gráfico fluencia Marshall <i>versus</i> porcentaje de asfalto	88
51.	Gráfico relación estabilidad/fluencia (REF) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	89
52.	Gráfico relación Filler/Betún (F/B) <i>versus</i> porcentaje de asfalto	90
53.	Gráfico gravedad específica bruta (Gmb) <i>versus</i> porcentaje de asfalto.....	91
54.	Gráfico gravedad específica teórica máxima (Gmm) <i>versus</i> porcentaje de asfalto	92

TABLAS

I.	Ensayos utilizados en la especificación SuperPave.....	15
II.	Características del asfalto base según Norma ASTM D3381	45
III.	Resultados de ensayos a asfalto base según Norma ASTM D3381	47
IV.	Resultados de ensayos a asfalto modificado con aceite crudo de palma según Norma ASTM D3381	48

V.	Temperaturas de mezclado y compactación para el asfalto base y el asfalto modificado con diferentes porcentajes de aceite de palma ...	63
VI.	Resumen de resultados agregado de 1" a núm. 56	65
VII.	Resumen de resultados agregado de 3/8" a núm. 8	66
VIII.	Resumen de resultados agregado de 1/4" a 0	66
IX.	Proporciones para combinación de agregados.....	67
X.	Gravedad específica bruta de la mezcla (Gmb) en función del porcentaje de asfalto.....	70
XI.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm) en función del porcentaje de asfalto	71
XII.	Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla (Va) en función del porcentaje de asfalto.....	72
XIII.	Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) en función del porcentaje de asfalto	74
XIV.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) en función del porcentaje de asfalto.....	75
XV.	Porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) en función del porcentaje de asfalto.....	76
XVI.	Estabilidad en libras de en función del porcentaje de asfalto	77
XVII.	Fluencia Marshall en función del porcentaje de asfalto	78
XVIII.	Relación estabilidad/fluencia en función del porcentaje de asfalto	79
XIX.	Relación Filler/Betún (F/B) en función del porcentaje de asfalto	80
XX.	Requisitos para la mezcla asfáltica en caliente	82
XXI.	Tabla 401-3 de las especificaciones de la DGC para valores del porcentaje de vacíos del agregado mineral, según el porcentaje de vacíos en la mezcla	83
XXII.	Resumen de propiedades de la mezcla para 4,70 % de asfalto	93
XXIII.	Resumen de propiedades de la mezcla con 4,70 % de asfalto sin modificar	94

XXIV.	Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma.....	95
XXV.	Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma.....	96
XXVI.	Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma.....	97
XXVII.	Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto sin modificar y con asfalto modificado con aceite de palma.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ACP	Abreviación de Aceite Crudo de Palma
δ	Ángulo de fase
cm	Centímetro
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
SF₆	Hexafluoruro de azufre
HFC	Hidrofluorocarbonos
KPa	Kilo Pascal
Kg	Kilogramo
lb	Libra
CH₄	Metano
m	Metro
ml	Mililitros
min	Minuto
G*	Módulo de corte complejo
N₂O	Óxido nitroso
Pa-s	Pascal por segundo
PFC	Perfluorocarbonos
%	Porcentaje
rpm	Revoluciones por minuto
seg	Segundo

Ton

Tonelada

GLOSARIO

AASHTO	American Association of Highways and Transportation Officials.
Abrasión	Desgaste producido a un material por acción de fricción.
Agregado fino	Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm.
Agregado grueso	Agregado que pasa el tamiz de 6,36 mm y queda retenido en el tamiz núm. 4.
Asfalto	Material cementante, de color entre carmelito oscuro y negro, en el cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. El asfalto es un constituyente, en proporciones variables, de la mayoría de petróleos crudos.
Asfalto modificado	Producto resultante de la incorporación en el asfalto de un aditivo o polímero.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Bitumen	Sustancia cementante de color negro (sólida, semi sólida 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 asfaltitas.

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.

Compactación

Acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño. Generalmente la compactación se logra usando los rodillos o compactadores neumáticos.

Consistencia

Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura. La consistencia de un cemento asfáltico varía con la temperatura; por lo tanto es necesario usar una temperatura patrón cuando se está comparando la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro. La temperatura utilizada para este propósito es 60 °C (140 °F).

Deformación

Cualquier cambio que presente un pavimento respecto a su forma original.

Densidad

Grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada. Está limitada por la eliminación total de

los vacíos que se encuentran entre las partículas de la mezcla.

Ductilidad	Capacidad de una sustancia para ser estirada o estrechada en forma delgada.
Emulsión	Mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera mas o menos homogénea.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad está en función de la cohesión y la fricción interna del material.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada (10-2 plg) de la briqueta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Gravedad específica	Comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua.
Ligante	Son materiales cuya función principal es la de pegar o unir.
Mezcla asfáltica en caliente	Mezclas de planta que deben ser colocadas y compactadas a temperaturas elevadas.
Mezcla asfáltica tibia	Mezcla asfáltica producida y colocada a temperaturas significativamente inferiores a la mezcla en caliente, sin perjudicar su desempeño.

Oxidación	Proceso en el que se descompone la materia orgánica mediante la aportación de oxígeno y a la actividad de los microorganismos.
Penetración	Consistencia de un material bituminoso, se expresa como la distancia, en décimas de milímetro (0,1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.
Poise	Unidad, centímetro-gramo-segundo, de viscosidad absoluta.
Reología	Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia.
Reómetro	Aparato para medir las propiedades reológicas del asfalto en condiciones de laboratorio.
Rigidez	Medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material.
Trabajabilidad	Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.
Vacío	Espacios de aire en una mezcla compactada rodeados de partículas cubiertas de asfalto.

Viscoelástico	Material que presenta tanto propiedades viscosas como elásticas.
Viscosidad	Medida de la resistencia al flujo. Método usado para medir la consistencia del asfalto.
Viscosidad absoluta	Método utilizado para medir viscosidad usando el poise como la unidad de medida. Este método hace uso de un vacío parcial para inducir el flujo en el viscosímetro.
Viscosidad cinemática	Método utilizado para medir viscosidad usando el poise como la unidad de medida.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se realizó para determinar el potencial del aceite crudo de palma africana como aditivo reductor de viscosidad en el asfalto para producir mezclas asfálticas tibias.

Se elaboró un diseño de mezcla asfáltica mediante el método Marshall, que cumpliera con las especificaciones de la Dirección General de Caminos, utilizando agregados de graduación tipo D y asfalto AC-20 sin modificar, para usarla como patrón de comparación con la mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de palma. Para realizar la comparación se elaboraron muestras de mezcla asfáltica con el mismo contenido de asfalto y agregados que la mezcla patrón, pero usando asfalto con diferentes dosificaciones de aceite de palma, lo que permitió observar la incidencia del aceite de palma en algunas propiedades del asfalto, y por ende de la mezcla asfáltica, llegando a la conclusión de que el aceite de palma puede ser usado para producir mezclas asfálticas tibias, sin perjudicar el desempeño de las mismas.

OBJETIVOS

General

Desarrollar una mezcla asfáltica adicionada con aceite crudo de palma que pueda ser producida y mezclada a temperaturas más bajas que la mezcla asfáltica en caliente convencional.

Específicos

1. Evaluar el potencial del aceite crudo de palma como reductor de viscosidad del asfalto.
2. Determinar la dosificación óptima de aceite de palma para producir mezcla asfáltica tibia, sin alterar las propiedades de la mezcla.
3. Elaborar el diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall de una mezcla convencional para reproducirlos con la mezcla modificada con el aceite de palma.
4. Comparar los resultados de desempeño en laboratorio de la mezcla asfáltica tibia con resultados de la mezcla patrón.

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100 y 135 °C. Para que el asfalto tenga la suficiente trabajabilidad y pueda ser mezclado con los agregados, es necesario modificarlo con aditivos reductores de viscosidad, con el fin de que mantenga las características de una mezcla asfáltica en caliente.

Se evaluó el potencial del aceite crudo de palma proveniente de la planta extractora Pataxte, ubicada en El Estor, Izabal, como reductor de viscosidad del asfalto, realizando y ensayando muestras con diferentes porcentajes por peso; para determinar la cantidad óptima de aceite que proporcione las características deseadas en la mezcla asfáltica tibia, a temperaturas inferiores a las de la mezcla asfáltica en caliente.

1. ASFALTO

1.1. Antecedentes

El término asfalto se remonta a la época babilónica, más adelante fue adoptado por los griegos en forma de adjetivo para “firme”, “estable”, “seguro”, y en forma de verbo correspondiente a “volver firme, asegurar”. Los usos más antiguos del asfalto fueron para asegurar o juntar varios objetos, y por lo tanto parece que el término en sí fue expresivo para esta aplicación. Del griego pasó luego al latín y después al francés (*asphalte*) y finalmente al inglés (*asphalt*).

El uso del asfalto como ligante de agregados pétreos en mezclas asfálticas se remonta a la década de 1860, época en la que se comenzó a utilizar la mezcla asfáltica en caliente para pavimentos en Estados Unidos.

1.2. Descripción

Según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), el asfalto es un material cementante de color café oscuro a negro, el cual se constituye principalmente de bitúmenes, que se encuentra en la naturaleza o se obtiene en la refinación del petróleo.

El asfalto está compuesto de hidrocarburos y sus derivados es soluble en bisulfuro de carbono. El asfalto no es volátil a temperatura ambiente, y se suaviza gradualmente cuando se calienta; es catalogado como un material viscoelástico comportándose como un sólido a bajas temperaturas y como líquido viscoso a temperaturas altas.

1.3. Características físicas del asfalto de pavimentación

El asfalto tiene características físicas que determinan el comportamiento de la mezcla asfáltica en condiciones de servicio en un pavimento, las características que más influyen son las siguientes:

1.3.1. Durabilidad

La durabilidad de un asfalto es la medida de qué tanto puede mantener un asfalto sus características originales a lo largo de su tiempo de vida en servicio, las cuales no se mantienen constantes, debido a que el asfalto está compuesto de moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del medio ambiente, este proceso se conoce como oxidación y cambia la estructura molecular del asfalto. La oxidación es un proceso normal de degradación o envejecimiento del asfalto que ocurre en el pavimento.

1.3.2. Adhesión y cohesión

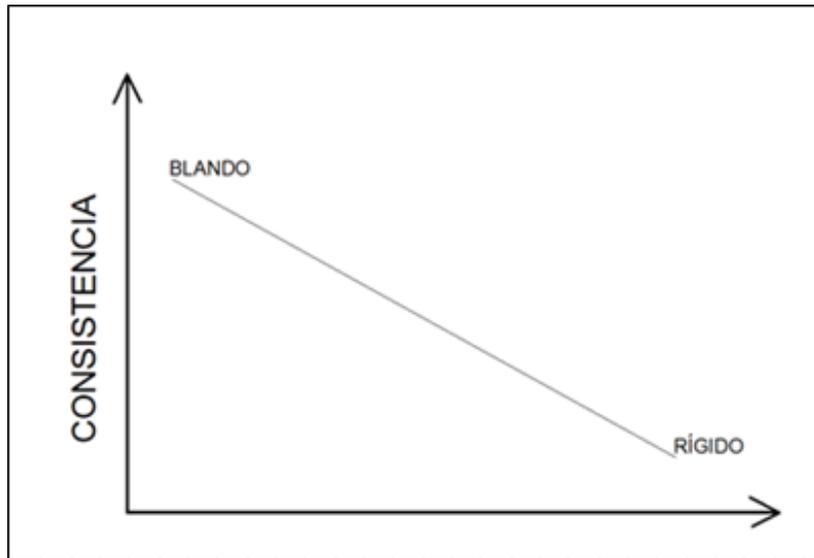
La adhesión es la propiedad de la materia por la cual se unen y plasman dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares. La adhesión del asfalto es importante, ya que determina que tan bien se puede adherir el asfalto a las partículas de agregados pétreos, esto se traduce en una buena resistencia al desprendimiento de la película de asfalto en presencia de humedad.

1.3.3. Susceptibilidad a la temperatura

Es la relación entre la consistencia del asfalto y la temperatura del mismo. Debido a que el asfalto es un material viscoelástico que cambia de consistencia al aumentar o disminuir su temperatura, este se comporta como un sólido a bajas temperaturas y como un líquido a temperaturas altas.

Es importante conocer el comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas, porque para producir la mezcla asfáltica en caliente el ligante asfáltico debe tener una viscosidad lo suficientemente baja para que la mezcla sea trabajable, y debe conocerse el rango de temperaturas para lograr dicha viscosidad; además el asfalto debe tener una buena consistencia a temperatura ambiente para lograr el comportamiento deseado de la mezcla asfáltica en el pavimento.

Figura 1. **Gráfica consistencia versus temperatura en el asfalto**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCad.

1.3.4. Envejecimiento y endurecimiento

El resultado de la oxidación en el asfalto es una estructura molecular más frágil, y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. El fenómeno de oxidación ocurre en un pavimento a velocidades relativamente bajas y es mucho más rápido en un clima cálido que en un clima frío. Debido al endurecimiento por oxidación los pavimentos viejos son más susceptibles a fallas por agrietamiento, aunque los pavimentos nuevos pueden ser propensos a una oxidación más severa si no tienen una compactación adecuada, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que permite que una cantidad mayor de oxígeno ingrese en la mezcla asfáltica provocando un envejecimiento acelerado por oxidación.

Aunque el envejecimiento por oxidación ocurre a lo largo de la vida de servicio del pavimento, una parte considerable del envejecimiento por oxidación ocurre durante la etapa de mezclado en planta, que se realiza a elevadas temperaturas, y debido a que el asfalto que recubre a los agregados se encuentra en películas muy delgadas, la oxidación ocurre a velocidades mucho mayores.

Otro tipo de endurecimiento ocurre en la etapa de producción de la mezcla y se denomina volatilización, debido a que a altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles son en su mayoría, aceites livianos que le dan al asfalto una consistencia blanda.

1.3.5. Pureza

La pureza de un asfalto radica en qué tan soluble es el asfalto en bisulfuro de carbono. El asfalto obtenido mediante la refinación del petróleo es casi bitumen puro y usualmente es soluble en bisulfuro de carbono en más del 99,5 %, la materia orgánica y las impurezas son inertes.

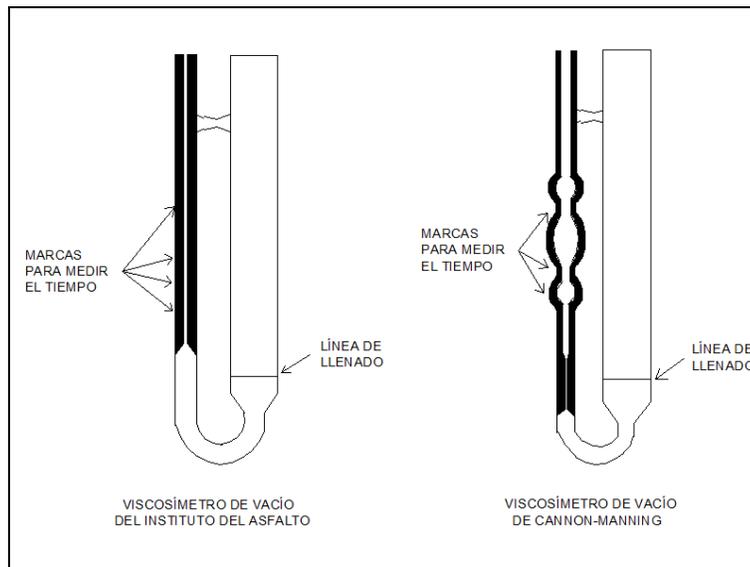
1.4. Especificaciones sobre los cementos asfálticos

Los cementos asfálticos pueden tener comportamientos diferentes unos con otros y es necesario caracterizarlos con base en ciertas propiedades que pueden servir para predecir el desempeño del asfalto en la mezcla, las principales formas de caracterizar el asfalto son:

1.4.1. Caracterización por viscosidad

La viscosidad es la oposición de un fluido al flujo o deformación. El ensayo de viscosidad absoluta consiste en medir la viscosidad del asfalto por medio de un viscosímetro de tubo capilar, como el que se muestra en la figura. Este se coloca dentro de un baño maría a temperatura controlada de 60 °C, luego se vierte asfalto en el tubo grande hasta llegar al nivel de llenado marcado y se vuelve a colocar el viscosímetro en el baño de temperatura controlada por un tiempo establecido hasta que la temperatura del sistema se estabilice en 60 °C. Luego se utiliza una bomba de vacío en el tubo pequeño del viscosímetro para inducir el flujo del asfalto y se toma lectura del tiempo requerido para que el asfalto fluya entre dos marcas de tiempo, el cual se multiplica por una constante de calibración del viscosímetro para obtener la viscosidad absoluta en poises.

Figura 2. Viscosímetro capilar



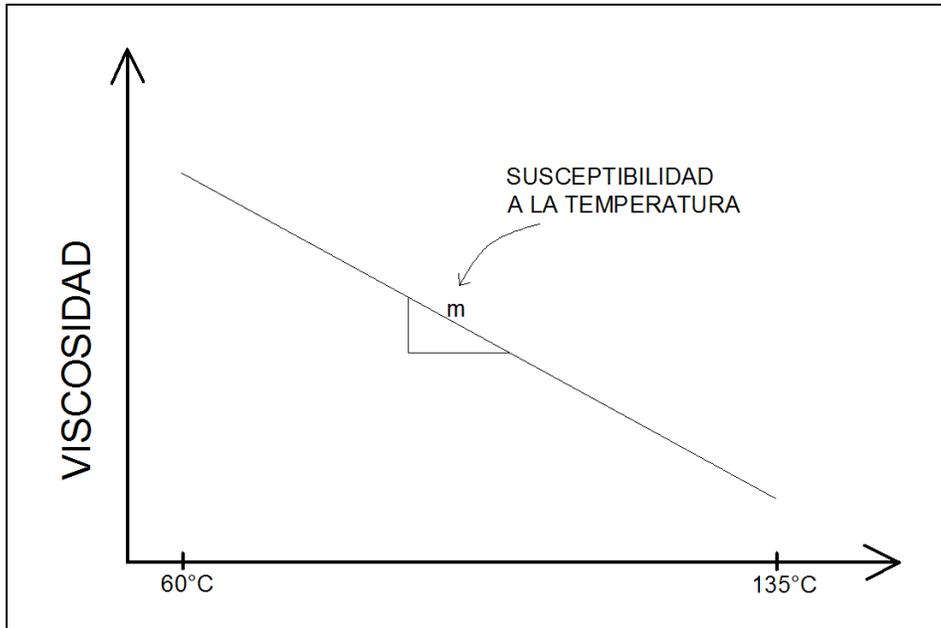
Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCad.

Desde comienzos de la década de 1970, la viscosidad ha sido utilizada como parámetro para caracterizar los ligantes asfálticos. Las Normas ASTM D 3381 y la Norma AASHTO M226 establecen que debe utilizarse la viscosidad absoluta del asfalto a 60 °C para la caracterización.

También se especifica la viscosidad a 135 °C, el objetivo de utilizar estas dos temperaturas es conocer la consistencia del asfalto en dos situaciones importantes. La temperatura de 60 °C fue escogida porque se aproxima a las temperaturas máximas a las que están sometidas las superficies de los pavimentos en Estados Unidos. La temperatura de 135 °C se escogió porque es cercana a la temperatura de colocación de la mayoría de mezclas asfálticas en caliente.

De esta forma, la especificación cubre la necesidad de saber la consistencia del asfalto a la temperatura de colocación, donde se requiere una buena trabajabilidad, y la consistencia del asfalto a temperaturas máximas de servicio, donde se requiere de rigidez. Se acostumbra a graficar los valores de viscosidad para las temperaturas de ensayo en un gráfico de viscosidad-temperatura uniendo los puntos con una línea recta, donde la pendiente de la línea representa la susceptibilidad a la temperatura del asfalto.

Figura 3. **Gráfica de la susceptibilidad a la temperatura en un asfalto**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa AutoCad.

La especificación cuenta con dos sistemas para caracterizar el asfalto por viscosidad. El primero es el sistema AC (Asphalt Cement) en el que se utiliza asfalto no envejecido para realizar el ensayo de viscosidad y cuenta con los grados AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40. El valor numérico de cada grado denota la viscosidad del ligante expresada en cientos de poises, es decir, para que un asfalto cumpla con el grado AC-20, este debe tener una viscosidad a 60 °C de 2 000 poises, donde las variaciones permisibles para cada grado son de $\pm 20 \%$.

El segundo sistema para caracterización del asfalto es el sistema AR (*Aged Residue*) donde se ensaya el asfalto luego de ser sometido a la prueba de horno rotatorio de película delgada y cuenta con los grados AR-1 000, AR-2 000, AR-4 000, AR-8 000 y AR-16 000, donde al igual que en el sistema AC, el valor numérico denota la viscosidad del ligante asfáltico, con una tolerancia de $\pm 25 \%$.

El sistema de caracterización por viscosidad tiene algunas limitantes, ya que se realizan ensayos para conocer las propiedades del asfalto a temperatura intermedia y alta, pero se desconoce el comportamiento del asfalto a temperaturas bajas.

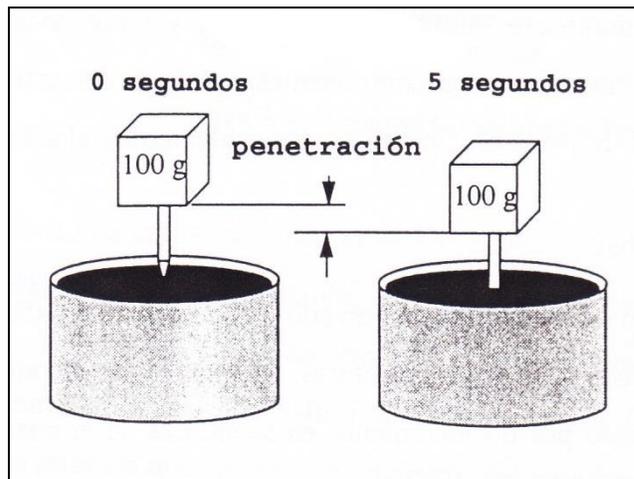
1.4.2. Caracterización por penetración

En el año de 1947 fue creada la Norma ASTM D946 con el objetivo de controlar la calidad de los ligantes asfálticos y se conoce como caracterización por penetración, debido a que esta es la propiedad que determina el grado de un asfalto en este sistema.

El ensayo de penetración es un ensayo empírico, uno de los más antiguos que se utiliza para medir la consistencia del asfalto. El ensayo consiste en verter 100 g de asfalto en un contenedor cilíndrico de aproximadamente 3 onzas y se acondiciona en un baño maría a una temperatura constante de 25 °C durante el tiempo especificado en la norma.

Luego del tiempo de acondicionamiento se coloca la muestra en el equipo de penetración, en donde una aguja calibrada de 50 g se sujeta al penetrómetro, es suspendida sobre el asfalto junto con una carga adicional de 50 g para tener una carga total de 100 g. Luego, se hace bajar la aguja lentamente hasta que apenas roce la superficie del asfalto, en este punto, se libera la aguja, permitiendo que penetre en la muestra de asfalto durante 5 seg, y se registra la profundidad a la que penetró la aguja. El valor de penetración se reporta como la profundidad de penetración de la aguja expresada en décimas de milímetro.

Figura 4. **Ensayo de penetración**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 6.

En el sistema de caracterización por penetración ASTM D946 o AASHTO M 20, el asfalto se clasifica en grados según el valor de penetración a 25 °C, realizado en el asfalto sin envejecer. Así, un asfalto de penetración 60-70 es uno que tiene una penetración mínima de 60 décimas de milímetros y una penetración máxima de 70 décimas de milímetros a 25 °C.

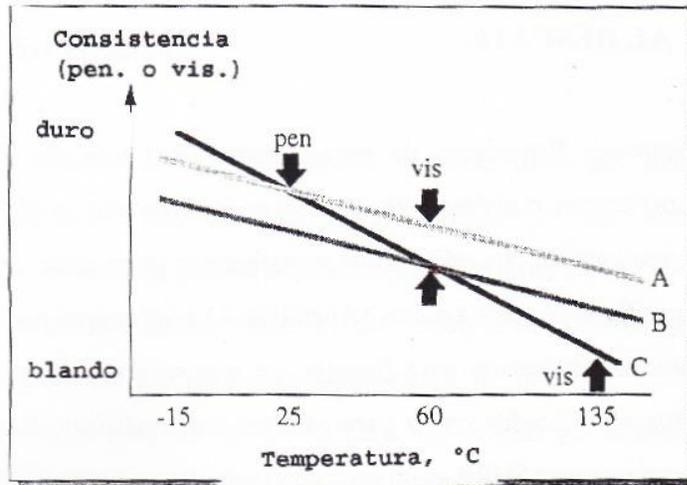
La caracterización del asfalto por penetración tiene algunas limitantes, una de ellas es que el ensayo de penetración es una prueba empírica, donde el desempeño del asfalto se estima según correlaciones de cómo se comportan asfaltos con penetraciones similares en el pavimento, siendo una relación que depende de qué tan certera sea la información utilizada. Otra desventaja de este sistema de caracterización es que se mide la consistencia del asfalto a una temperatura intermedia, y solo se puede inferir qué comportamiento va a tener el asfalto a temperaturas altas o bajas.

1.4.3. Caracterización por grado de desempeño según especificación SuperPave

El comportamiento del asfalto depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de carga que se le aplique, siendo estos factores intercambiables, es decir, el flujo de un asfalto puede ser el mismo en una hora a 60 °C que en 10 horas a 25 °C, por ejemplo.

Para determinar la consistencia del asfalto se utilizan los ensayos de penetración o de viscosidad, en ambos ensayos se toma en cuenta el efecto de la temperatura, ya que en el ensayo de penetración se mide la consistencia a 25 °C y con el ensayo de viscosidad se mide la consistencia a 60 °C. Los resultados se pueden representar gráficamente como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Gráfica de la consistencia de tres asfaltos diferentes



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 7.

Los tres asfaltos de la figura tienen el mismo grado de viscosidad, ya que entran en el mismo rango especificado a 60 °C. Como se puede observar, el asfalto A y B tienen la misma susceptibilidad a la temperatura, pero tienen una consistencia diferente a cualquier temperatura, mientras que el asfalto A y C tienen la misma consistencia a temperaturas intermedias, pero su consistencia es significativamente diferente a temperaturas altas o bajas; de la misma forma, el asfalto B tiene la misma consistencia que el asfalto C a 60 °C y su comportamiento a temperaturas altas o bajas es distinto. Debido a que estos asfaltos tienen el mismo grado, podría esperarse erróneamente que se comporten de manera similar durante su vida de servicio en climas fríos o cálidos, que, en este caso no es cierto.

Debido a lo descrito en el párrafo anterior, una mezcla asfáltica con un asfalto de cierto grado de viscosidad o de penetración no se comportaría de igual manera en un clima frío que en un clima caliente, lo que produciría fallas como deformación permanente o ahuellamiento, fallas por fatiga o fracturas térmicas.

Para solucionar estos problemas, en 1987 el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program) llevó a cabo una investigación millonaria para determinar el comportamiento de los ligantes asfálticos a temperaturas bajas, intermedias y altas, así como nuevas especificaciones para agregados y un nuevo método de diseño de mezclas, el resultado de dicha investigación dio origen al sistema de clasificación SuperPave (Superior Performing Asphalt Pavements), que clasifica a los ligantes asfálticos con base a su comportamiento, teniendo parámetros deseados de desempeño iguales para todos los grados, donde las temperaturas a las que un asfalto cumple los requisitos de la especificación, el parámetro de referencia para definir los grados de la especificación como se muestra en la figura 6.

Figura 6. **Tabla de requisitos de la especificación SuperPave**

AASHTO Performance Graded Binder Specification (MP1)

Performance Grade	PG 52							PG 58				PG 64					PG 70				
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28
Average 7-day Maximum Pavement Design Temperature, °C ^a	>52							>58				>64					<70				
Minimum Pavement Design Temperature, °C ^a	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>46	>16	>22	>28	>34	>40	>16	>22	>28	>34	>40	>10	>16	>22	>28
Original Binder																					
Flash Point Temp, T48: Minimum °C	230																				
Viscosity, ASTM D 4402: ^b Maximum, 3 Pa s (3000 cP), Test Temp, °C	135																				
Dynamic Shear, TP5: ^c G*/sin delta, Minimum, 1.00 kPa Test Temperature @ 10 rad/s, °C	52							58				64					70				
Rolling Thin Film Oven (T240) or Thin Oven (T179) Residue																					
Mass Loss, Maximum, %	1.00																				
Dynamic Shear, TP5: G*/sin delta, Minimum, 2.20 kPa Test Temp @ 10 rad/sec, °C	52							58				64					70				
Pressure Aging Vessel Residue (PPI)																					
PAV Aging Temperature, °C ^d	90							100				100					100(110)				
Dynamic Shear, TP5: G*/sin delta, Maximum, 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/sec, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	28	25	22	19	16	34	31	28	25
Physical Hardening																					
Report																					
Creep Stiffness, TP1: ^f S, Maximum, 300 MPa m-value, Minimum, 0.300 Test Temp, @ 60 sec, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30	0	-6	-12	-18
Direct Tension, TP3: ^f Failure Strain, Minimum, 1.0% Test Temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30	0	-6	-12	-18

Fuente: Norma AASHTO MP1.

El sistema de clasificación SuperPave introdujo nuevos métodos de ensayo para ligantes afálticos, cada uno con un objetivo, los cuales se detallan en la tabla I.

Tabla I. **Ensayos utilizados en la especificación SuperPave**

Procedimiento	Objetivo
Reómetro de corte directo (DSR)	Medir propiedades a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotativo (RV)	Medir propiedades a altas temperaturas
Reómetro de viga a flexión (BBR)	Medir propiedades a bajas temperaturas
Ensayo de tracción directa (DDT)	
Horno rotativo de película delgada (RTFO)	Simular el endurecimiento durante la etapa constructiva
Cámara de envejecimiento a presión (PAV)	Simular el envejecimiento durante la vida útil

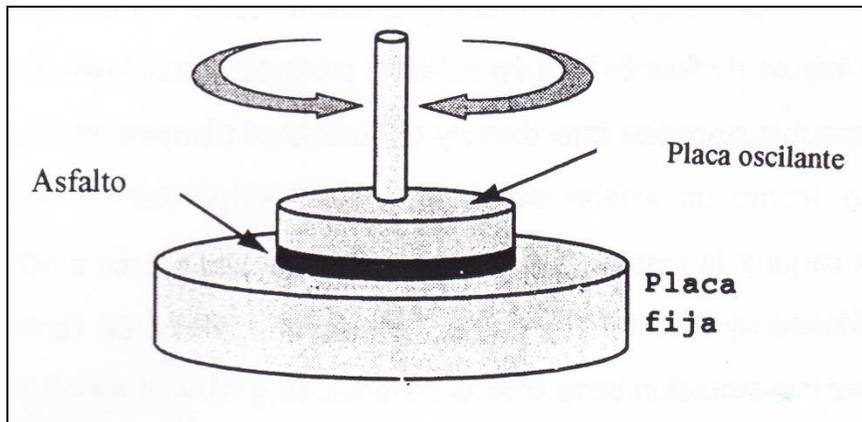
Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 8.

1.4.4. Procedimientos de ensayos SuperPave

El reómetro de corte dinámico se utiliza para medir las propiedades reológicas del asfalto como el módulo de corte complejo (G^* pronunciado como G-estrella), ángulo de fase (δ , la letra griega minúscula *delta*). El módulo de corte complejo es la medida de la resistencia de un material a la deformación bajo esfuerzos de corte repetitivos y está compuesto por las componentes elásticas (recuperables) y viscosas (no recuperables) del asfalto. El valor de G^* corresponde a la magnitud del vector resultante entre las componentes y el valor de δ el ángulo que forma el vector con la horizontal.

La operación del reómetro consiste en colocar la muestra de asfalto entre un plato fijo y un plato oscilatorio, como se muestra en la figura 7. El plato gira desde el punto A hasta el B, luego regresa y pasa por A hasta llegar a C, y desde C el plato regresa al punto A para completar un ciclo de carga.

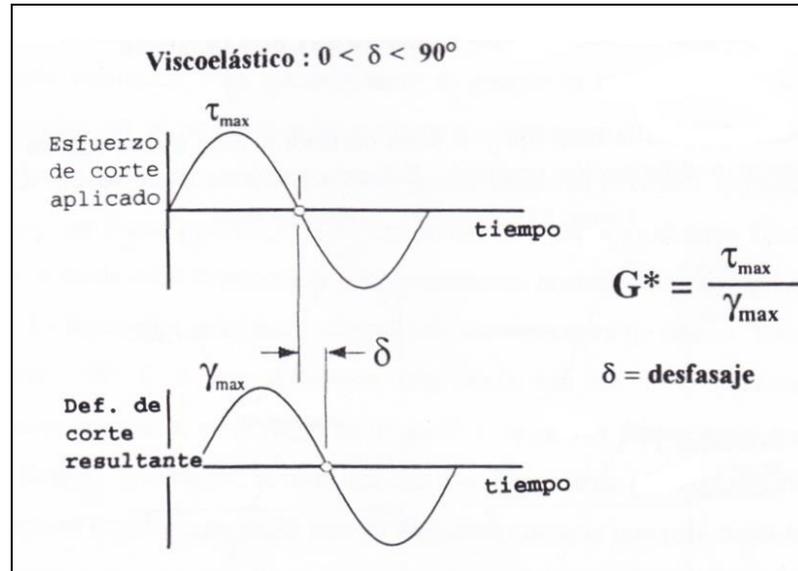
Figura 7. **Funcionamiento del reómetro de corte dinámico**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 21.

Los valores de G^* y δ en los asfaltos dependen de la temperatura y de la frecuencia de aplicación de carga. A altas temperaturas el asfalto se comporta como un líquido viscoso, y a muy bajas temperaturas se comporta como un sólido elástico, pero a las temperaturas a las que los pavimentos soportan el tránsito, los asfaltos se comportan simultáneamente como líquidos viscosos y sólidos elásticos, y una parte de la deformación del pavimento bajo carga es elástica (recuperable) y otra parte es viscosa (no recuperable), es por esto que el asfalto se define como un material viscoelástico. Midiendo G^* y δ , el reómetro de corte dinámico es capaz de ofrecer información más completa del comportamiento del asfalto a las temperaturas de servicio del pavimento.

Figura 8. Comportamiento de un material viscoelástico



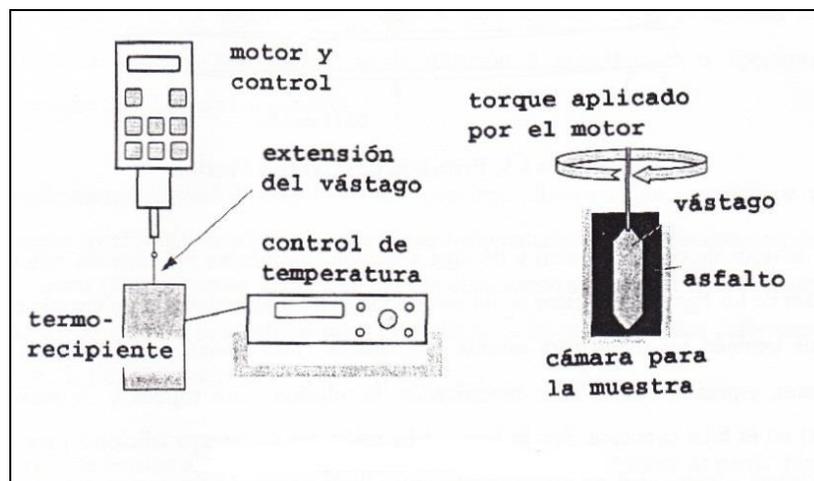
Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 22.

El viscosímetro rotacional, conocido también como viscosímetro Brookfield, se utiliza para medir la viscosidad rotacional del asfalto a cualquier temperatura. En la especificación SuperPave se utiliza el ensayo de viscosidad rotacional para medir la viscosidad del asfalto a 135 °C, la cual no debe ser mayor a 3 Pa-s, para asegurar que el asfalto es lo suficientemente fluido para ser bombeado sin complicaciones.

El viscosímetro rotacional determina la viscosidad del asfalto midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico, que es sumergido en una muestra de asfalto contenida en una cápsula que se coloca dentro de un sistema que mantiene constante la temperatura de la muestra mediante un termorecipiente y un controlador de temperatura.

El viscosímetro calcula automáticamente la viscosidad a temperatura de ensayo. Se puede utilizar para construir las curvas de viscosidad *versus* temperatura, utilizadas para determinar las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto.

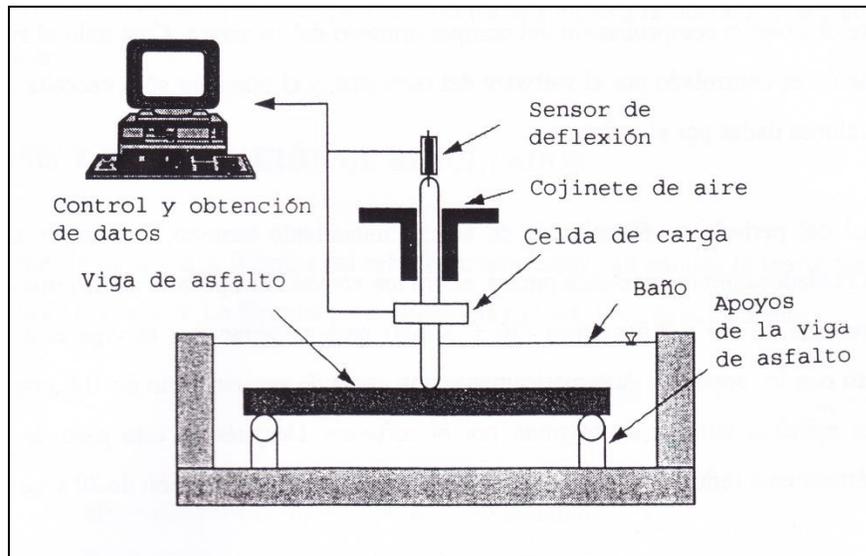
Figura 9. **Viscosímetro Brookfield**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 11.

El reómetro de viga a flexión se utiliza para medir la rigidez y velocidad de la deformación del asfalto a temperaturas bajas mediante una pequeña viga simplemente apoyada, que es sometida a una carga sostenida aplicada en el centro de la viga durante cuatro minutos. Se mide constantemente la deflexión de la viga, esta aumenta gradualmente durante el tiempo de aplicación de la carga, debido a que el asfalto no es un material puramente elástico.

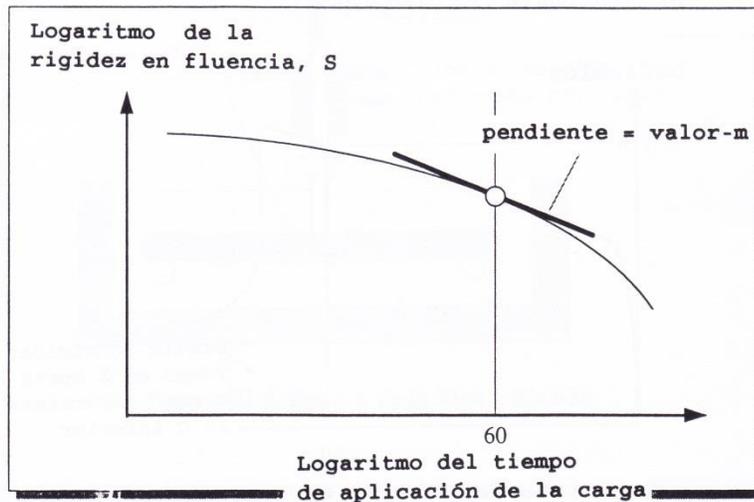
Figura 10. Reómetro de viga a flexión



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 29.

El reómetro de viga a flexión utiliza un software que grafica automáticamente el módulo de elasticidad de la viga en función del tiempo, con la que se calcula la rigidez a los 60 segundos de haber aplicado la carga y la pendiente de la gráfica en ese punto, conocida como valor-m. Ambos parámetros son parte de los requisitos de la especificación SuperPave para controlar la fisuración del pavimento debido a bajas temperaturas.

Figura 11. **Gráfica rigidez versus tiempo**

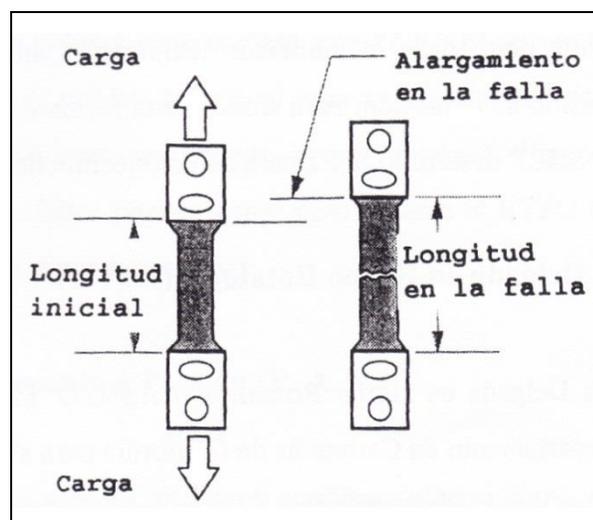


Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 32.

El ensayo de tracción directa se utiliza para determinar la deformación que se produce en el asfalto a bajas temperaturas antes de fallar, y proporciona información que se complementa con los resultados del reómetro de viga a flexión. La rigidez de un asfalto no necesariamente está relacionada con la capacidad de alargarse antes de fallar, y existen ciertos tipos de ligantes, especialmente los asfaltos modificados, que presentan una alta resistencia a la deformación, lo que los definiría como rígidos, pero pueden alargarse más que otros antes de fallar, es por ello que la especificación permite que un ligante tenga una alta resistencia a la deformación si muestra un comportamiento razonablemente dúctil a altas temperaturas.

El ensayo consiste en estirar una muestra de asfalto con forma de hueso de perro a una velocidad de deformación constante muy pequeña hasta la falla. La deformación en la falla es el aumento de la longitud de la muestra y se utiliza para calcular la deformación unitaria, la cual se expresa como porcentaje.

Figura 12. **Ensayo de tracción directa**



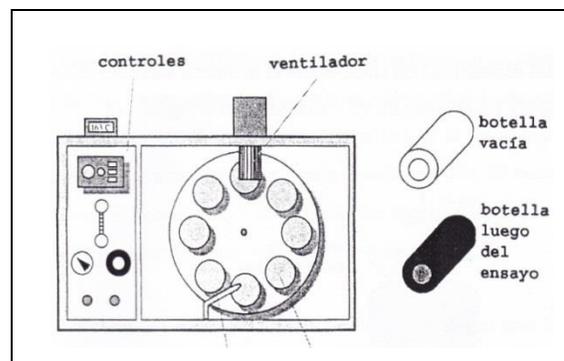
Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 13.

El horno rotatorio de película delgada, conocido como RTFO por sus siglas en inglés (*rolling thin film oven*), se utiliza para simular el envejecimiento que sufre el asfalto durante la etapa de producción de mezcla asfáltica en caliente y es una mejora al anterior método de envejecimiento utilizado, el ensayo del horno de película delgada; debido a que la acción rotatoria del RTFO expone continuamente al ligante a calor y flujo de aire, y mantiene en algunos casos los modificadores (como polímeros) dispersos en el asfalto, porque algunos asfaltos modificados al estar en reposo forman una capa superficial que obstruye el envejecimiento durante el ensayo.

Otra ventaja del RTFO es que el ensayo requiere un tiempo de 85 minutos, en comparación con las 5 horas que requería el ensayo utilizando el TFO (*thin gilm oven*). El ensayo cubre dos propósitos, uno es producir un asfalto envejecido para ser utilizado para ensayos adicionales, y el otro es determinar la pérdida de masa debido a la volatilización de algunos componentes del asfalto, la cual según la especificación no puede ser mayor a 1 %.

El ensayo consiste en verter $35 \pm 0,5$ g de asfalto en cada una de las 8 botellas de vidrio cilíndricas. Las botellas son introducidas en el horno, el cual debe ser precalentado a la temperatura de envejecimiento ($163 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) por un mínimo de 16 horas; luego se enciende el carrusel, que consiste en un disco con 8 agujeros donde se sostienen las botellas, que debe girar a una velocidad de $15 \pm 0,2$ rpm y se inyecta un flujo de aire de $4\ 000 \pm 200$ ml/min mediante una boquilla ubicada en la parte inferior del horno y que apunta al interior de las botellas. Después de 85 minutos se retiran las botellas y se extrae el asfalto para ser utilizado como muestra en ensayos posteriores.

Figura 13. **Horno rotatorio de película delgada**

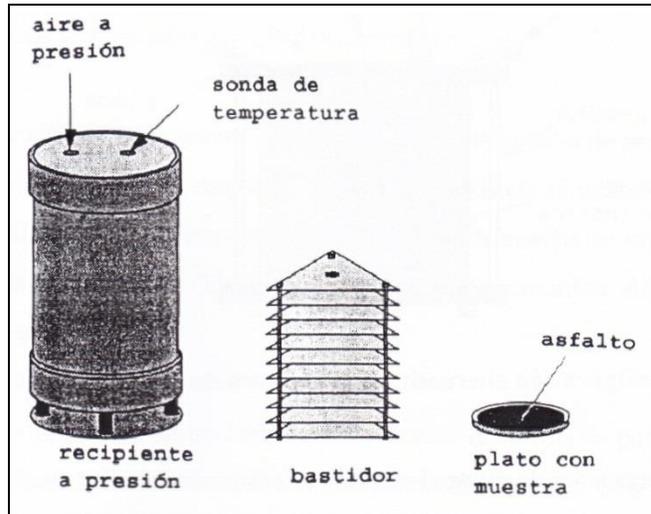


Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 15.

La cámara de envejecimiento a presión, conocida como PAV por sus siglas en inglés (*pressure aging vessel*), simula el envejecimiento del asfalto durante largos períodos de servicio en el pavimento, en un tiempo de solo 20 horas.

El equipo consiste en una cámara de calor y en un recipiente a presión. La cámara de calor es un horno de ventilación forzada y el recipiente a presión es de acero inoxidable, capaz de soportar una presión de 2 070 KPa y una temperatura de 90, 100 o 110 °C, dependiendo del grado del ligante que se vaya a ensayar. La muestra que se utiliza para el ensayo es el asfalto envejecido obtenido del RTFO, colocado en bandejas circulares con una capacidad de 50 g cada una, que son colocadas en un bastidor con capacidad para 10 bandejas. El bastidor se introduce en el recipiente a presión, que ha sido precalentado a la temperatura de ensayo, al cual se le conecta un sensor de temperatura y una manguera de presión y se introduce dentro de la cámara de calor durante 20 horas. Después de transcurrido el tiempo de ensayo se libera gradualmente la presión del recipiente en un tiempo aproximadamente de 8 a 10 minutos para que no se formen burbujas de aire en el asfalto. Las bandejas se retiran del bastidor y se colocan en un horno a 163 °C durante 30 minutos para eliminar burbujas de aire que puedan quedar en el asfalto.

Figura 14. **Cámara de envejecimiento a presión**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SuperPave*. p. 55.

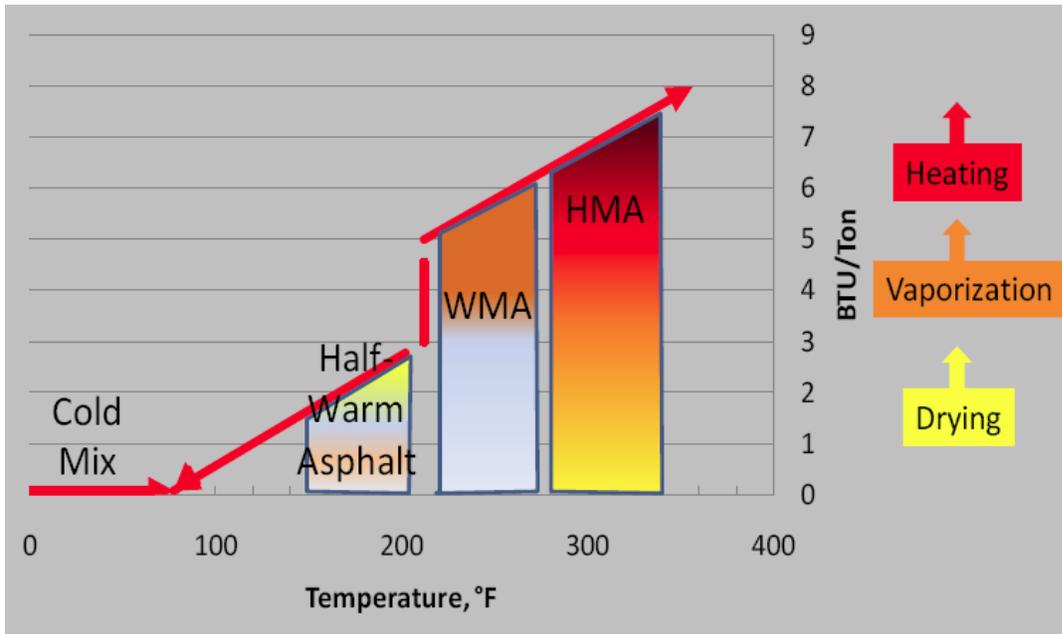
2. MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

2.1. Antecedentes

Las mezclas asfálticas en caliente han sido una de las formas más utilizadas para producir concreto asfáltico durante el último siglo debido a su buen desempeño mecánico. Una de las desventajas de la mezcla asfáltica en caliente es su alto impacto al medio ambiente, pues para lograr una buena trabajabilidad en la mezcla y un adecuado recubrimiento de los agregados, el ligante asfáltico debe ser calentado a temperaturas superiores a los 160 °C, este eleva el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

A partir del Protocolo de Kyoto ha surgido la necesidad de desarrollar tecnologías para permitir la producción y compactación mezclas asfálticas de pavimentación a temperaturas inferiores a las convencionales con el objetivo de reducir el consumo de energía durante su producción y disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) sin comprometer el desempeño de las mezclas bajo condiciones de servicio.

Figura 15. **Clasificación de mezclas asfálticas según temperatura**



Fuente: Asphalt Pavement Association of Oregon. *Warm Mix Asphalt-Oregon Experience 2009*.

p. 8.

2.2. Descripción

Mezclas asfálticas tibias es el término empleado para describir el conjunto de tecnologías que permiten la fabricación de mezclas asfálticas a menores temperaturas que las especificadas para mezclas asfálticas en caliente modificadas y convencionales.

Existe una gran variedad de tecnologías para producir mezclas asfálticas tibias y se pueden agrupar en base al sistema utilizado para la reducción de temperatura de mezclado, como la utilización de aditivos reductores de viscosidad en el ligante, sistemas a base de asfalto espumado y de emulsión.

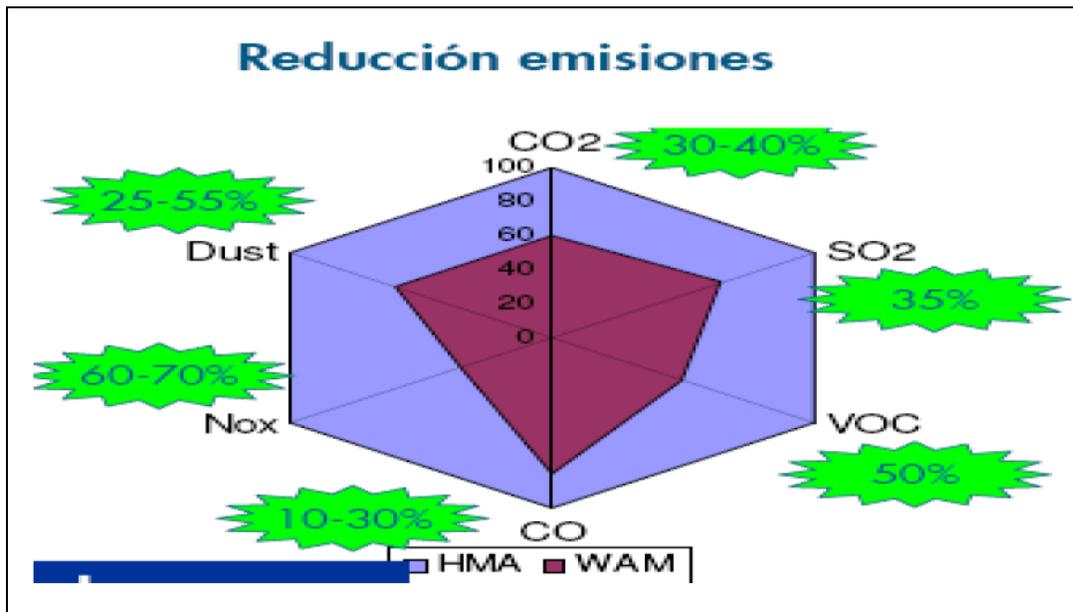
2.3. Beneficios de la mezcla asfáltica tibia

Las mezclas asfálticas tibias tienen ventajas respecto a las mezclas en caliente convencionales, como la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, condiciones más seguras para los trabajadores, reducción de costos de producción, entre otras.

2.3.1. Reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

Uno de los beneficios más destacables de las mezclas asfálticas tibias es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de dióxido de carbono (CO₂). El Protocolo de Kyoto es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importante destinado a luchar contra el cambio climático. Los países que forman parte del Protocolo de Kyoto se comprometieron a reducir significativamente las emisiones dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), que son considerados como gases de efecto invernadero y dañan la capa de ozono, produciendo el fenómeno del cambio climático. Las mezclas asfálticas tibias reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con las mezclas en caliente, al disminuir la energía necesaria para su producción y colocación.

Figura 16. Reducción de emisiones registradas en la mezcla asfáltica tibia



Fuente: LOPERA PALACIOS, Conrado Hernando. *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de asfalto y aceite crudo de palma*. p. 36.

2.3.2. Exposición laboral a temperaturas inferiores de producción y extensión de la mezcla

Otra ventaja de las mezclas tibias es que los trabajadores, tanto los que están involucrados en la producción en planta, como los que colocan la mezcla en el pavimento, se exponen a temperaturas inferiores, generando condiciones de trabajo más seguras.

Figura 17. **Colocación de mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia**



Fuente: BARROS, CATHRINA, Office of Roadway Material testing. *Warm Mix Asphalt State of the Practice*. p. 49.

2.3.3. Reducción en el consumo de energía para producir la mezcla

La energía necesaria para producir mezclas tibias es significativamente menor a la energía que se requiere para producir las mezclas asfálticas en caliente convencionales. Según estudios, la producción de mezcla asfáltica tibia requiere entre un 20 a un 35 % menos combustible en comparación a la mezcla asfáltica convencional.

2.3.4. Mejoras en la colocación y compactación de la mezcla

Las mezclas asfálticas tibias presentan mejoras en su capacidad de compactación y requieren menor esfuerzo de la maquinaria para lograr la misma densidad que una mezcla en caliente, obteniendo valores muy cercanos a la densidad de diseño.

Figura 18. **Compactación de mezcla asfáltica tibia**



Fuente: LINCOLN, NOEL. Payne & Dolan, Inc. *Warm Mix Asphalt, A contractors Perspective*. p. 14.

2.3.5. Incremento en las distancias de acarreo

Las mezclas asfálticas tibias pueden ser transportadas a distancias mayores a las mezclas en caliente, debido a que la velocidad de enfriamiento es menor en las mezclas tibias en comparación a las mezclas en caliente. Se puede lograr también una apertura al tránsito en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

2.4. Métodos para producir mezclas tibias

Existen diferentes tecnologías para producir mezclas asfálticas tibias, tales como el uso de aditivos para reducir la viscosidad del asfalto, sistemas a base de asfalto espumado y sistemas basados en emulsión.

2.4.1. Sistema mediante el uso de aditivos

El objetivo de utilizar aditivos reductores de viscosidad en el asfalto es lograr la misma trabajabilidad de una mezcla en caliente, pero a menores temperaturas, sin perjudicar el desempeño de la mezcla. Existen aditivos orgánicos y sintéticos que pueden ser utilizados como reductores de viscosidad en el asfalto.

2.4.1.1. Sasobit

Es un aditivo sintético formado por ceras tipo Fisher-Tropsch. Estas son ceras no parafínicas, 100 % sintéticas, obtenidas a partir de gas natural y agua. Se tratan de cadenas hidrocarbonadas alifáticas (C40-C120), con puntos de fusión entre 185-239 °F.

El aditivo es producido por la empresa alemana Sasol, y se agrega a la mezcla en porcentajes de 1-1,5 %, permitiendo disminuciones en la temperatura de mezclado de 50-75 °F.

Figura 19. **Aspecto visual del aditivo Sasobit**



Fuente: National Center for Asphalt Technology. Production and Placement, WMA implementation workshop. p. 34.

2.4.1.2. Licomont

Es un aditivo compuesto por una mezcla de derivados de ácidos grasos, fabricado por la empresa Clariant y comercializado como Licomont BS 100. Se utiliza en proporciones cercanas al 3 % en relación al peso del ligante. La adición de Licomont BS 100 al asfalto permite producir mezclas con reducciones de temperaturas de 20-30 °C.

Figura 20. **Aspecto visual del aditivo Licomont BS 100 en granos**



Fuente: U.S. Department of transportation, Office of International Programs. Appendix D WMA Technologies. http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/wma_08_d.cfm.

Consulta: marzo de 2014.

2.4.1.3. Aditivos orgánicos

Algunas ceras o aceites vegetales han demostrado tener potencial de reducir la viscosidad en el asfalto, en Colombia se han hecho varias investigaciones acerca del uso de ceras naturales para producir mezclas tibias, con resultados satisfactorios.

2.4.1.3.1. Aceite crudo de palma africana

Este aceite tiene la capacidad de reducir significativamente la viscosidad en el asfalto, siendo una alternativa viable como aditivo reductor de viscosidad para producir mezclas tibias en países de Latinoamérica, donde la producción de aceite de palma está bastante extendida.

2.4.2. Sistemas a base de espuma

Estos utilizan tecnologías para producir asfalto espumado para incrementar el volumen del ligante, permitiendo mejoras en el espesor de la película de ligante que recubre a los agregados, y reduce la viscosidad a menores temperaturas.

2.4.2.1. Zeolita

Son minerales aluminosilicatos microporosos que destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente. Existen varios aditivos a base de zeolitas sintéticas, como el Aspha-min, que contienen alrededor de 20 % de agua en su interior, y se utilizan para producir asfalto espumado mediante la liberación del agua contenida al aumentar la temperatura. Con el uso de estos aditivos se puede lograr una reducción de entre 20-30 °C en la temperatura de producción de la mezcla.

Figura 21. **Aspecto visual del aditivo Aspha-min**

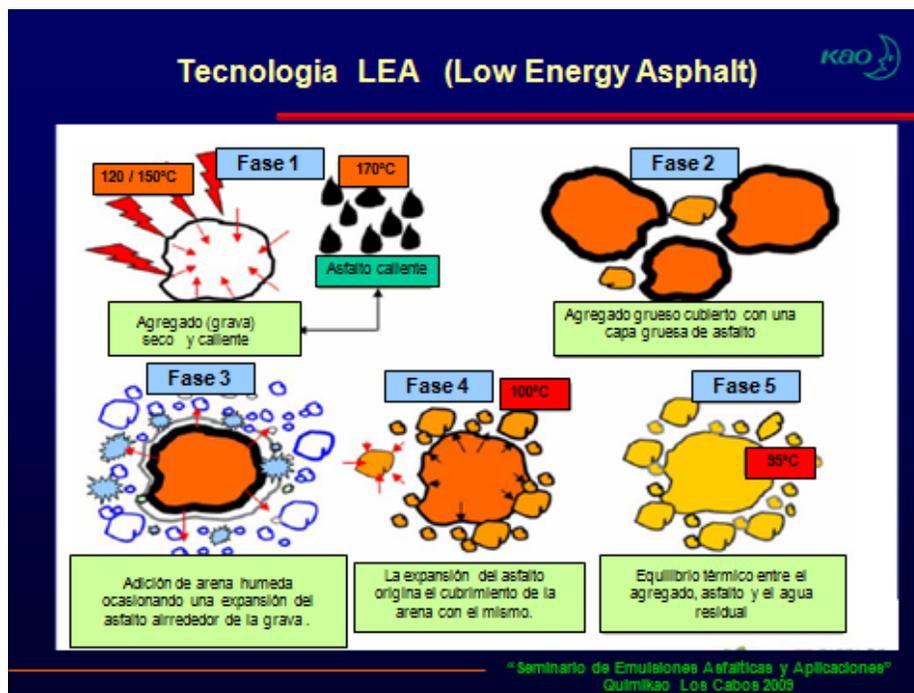


Fuente: Aspha-min®. <http://www.aspha-min.com/asphamin-en.html>. Consulta: marzo de 2014

2.4.2.2. Sistema *low energy asphalt*

Este sistema consiste en utilizar agregado fino húmedo durante el proceso de mezclado. El agregado grueso se calienta a una temperatura de alrededor de 150 °C y se mezcla con el ligante asfáltico a la temperatura normal de mezclado del ligante, que es mezclado con aditivos para mejorar la adhesión. Luego de que el agregado grueso ha sido cubierto por el ligante, se mezcla el agregado fino húmedo, con alrededor de 35 % de humedad, provocando que el agua se evapore y forme espuma en el asfalto. La temperatura resultante de la mezcla es menor a 100 °C.

Figura 22. Sistema Low Energy Asphalt

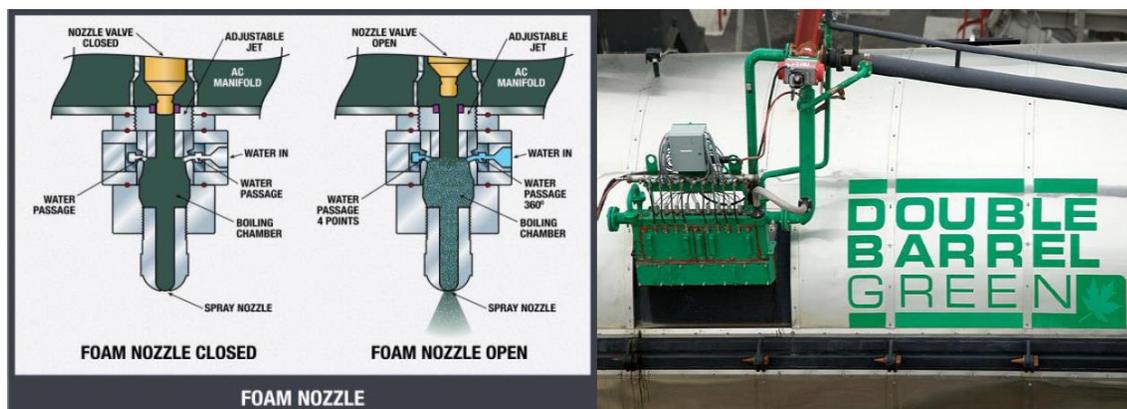


Fuente: LOPERA PALACIOS, Conrado Hernando. *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de asfalto y aceite crudo de palma*. p. 52.

2.4.2.3. Planta de doble tambor

El sistema de planta de doble tambor es un sistema patentado por Astec, con un nombre comercial de Double-Barrel Green. El sistema de doble tambor no utiliza aditivos y produce el asfalto espumado mediante la inyección de agua junto con el asfalto líquido. Las temperaturas de mezclado con plantas de este tipo son de entre 116 y 135 °C.

Figura 23. Planta de doble tambor, Astec Double-Green Barrel



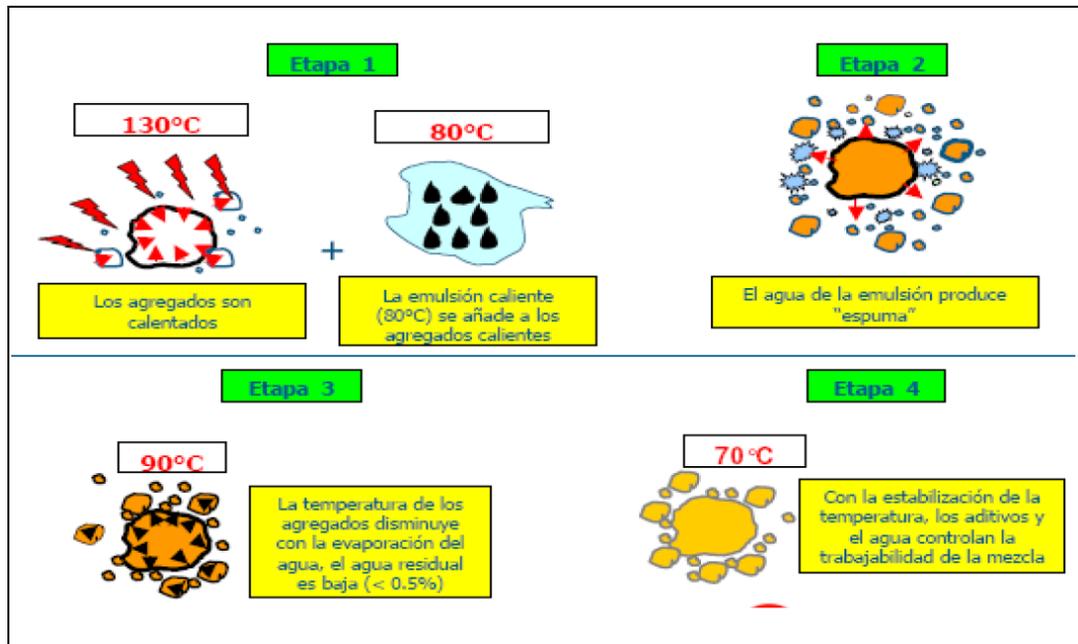
Fuente: LOPERA PALACIOS, Conrado Hernando. *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de asfalto y aceite crudo de palma*. p. 53.

2.4.3. Sistemas a base de emulsión

Utilizan emulsión asfáltica para producir asfalto espumado y reducir las temperaturas de producción de mezclas asfálticas. Uno de estos sistemas es el Evotherm, que utiliza emulsión con aditivos para mejorar la adhesión. El sistema consiste en calentar los agregados a unos 130 °C, luego se añade la emulsión caliente (cerca de 80 °C), la cual al entrar en contacto con los agregados libera el agua en forma de vapor, produciendo espuma en el asfalto.

La temperatura en la mezcla disminuye al evaporar el agua y puede llegar a los 70 °C.

Figura 24. **Planta de doble tambor, Astec Double-Green Barrel**



Fuente: LOPERA PALACIOS, Conrado Hernando. *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de asfalto y aceite crudo de palma*. p. 53.

3. ACEITE CRUDO DE PALMA

3.1. Descripción

Este aceite se obtiene del mesocarpio de la fruta de la palma africana o palma de aceite por proceso de extracción mecánica o por solventes y es de un color anaranjado rojizo. Se caracteriza por tener una relación 1:1 de ácido palmítico y ácido oleico, lo cual le imprime una alta estabilidad a la oxidación y no requiere de hidrogenación. Gracias a su relación de ácidos grasos, del aceite se obtiene dos fracciones: estearina y oleína, las cuales tienen un amplio rango de usos a nivel industrial.

Figura 25. Aceite crudo de palma



Fuente: Agrocaribe. <http://www.agrocaribe.com/aceite-crudo-de-palma-crude-palm-oil>.

Consulta: marzo de 2014.

La palma africana es una planta tropical propia de climas cálidos, cuyo origen se ubica en la región occidental y central del continente africano, concretamente en el golfo de Guinea, de ahí su nombre científico *Elaeis guineensis Jacq.*, donde ya se obtenía desde hace 5 milenios. A pesar de ello, fue a partir del siglo XV cuando su cultivo se extendió a otras regiones de África. La palma africana puede alcanzar alturas de hasta 40 metros en estado natural, pero en cultivos industriales se limita su altura entre los 10 y 15 metros, con troncos de entre 30 y 60 cm de diámetro.

Figura 26. **Cultivo de palma africana**



Fuente: Prensa Libre. http://www.prensalibre.com/noticias/Lideres-recorren-Europa_0_718128239.html. Consulta: marzo de 2014.

El fruto de la palma es de forma ovoide, de entre 3 y 6 cm de largo, con diámetros que alcanzan los 4 cm, y con un peso de 5 a 12 g aproximadamente. Los frutos son de color rojizo y son de pulpa fibrosa que contiene células con aceite y tienen una nuez o semilla compuesta por un cuesco lignificado y una almendra aceitosa o palmiste. Los frutos crecen en racimos de entre 10 y 40 kilogramos.

Figura 27. **Fruto de palma africana**



Fuente: Prensa Libre. http://www.prensalibre.com/noticias/Lideres-recorren-Europa_0_718128239.html. Consulta: marzo de 2014.

El proceso de extracción del aceite crudo de palma comienza con la recolección de los racimos en los cultivos, los cuales son llevados a la planta extractora, donde son esterilizados con vapor de agua a presión en autoclaves a una temperatura de 140 °C durante 78 minutos. Luego de la esterilización se separan los frutos cocidos por medio de rotación en un desfrutador, el escobajo restante se utiliza como abono orgánico en las plantaciones. El fruto es llevado a un digestor, donde por medio de prensado se extrae el aceite, el cual es llevado a un tanque preclarificador, donde se separa el aceite del lodo mediante un sistema de decantación, luego se disminuye la humedad que pueda contener el aceite mediante un sistema de vacío.

Guatemala es el cuarto mayor productor de aceite de palma africana a nivel mundial, con una producción de 350 000 toneladas de aceite al año, de la cual el 30 % es consumido a nivel nacional y el resto es exportado. El área de cultivo de palma en Guatemala es de 120 000 hectáreas, lo que representa el 4 % del área agrícola nacional, teniendo un rendimiento de 7 toneladas de aceite crudo por hectárea.

3.2. Usos del aceite de palma

El aceite de palma se utiliza como materia prima en alimentos, además de tener usos industriales, como los siguientes:

3.2.1. Culinarios

Es el aceite vegetal que más se utiliza en la industria alimentaria después del aceite de soya. De la oleína se obtiene el aceite de palma, el cual se utiliza como aceite vegetal para usos culinarios en el hogar o como materia prima en una gran variedad de productos alimenticios, como frituras, sopas, chocolates, helados, entre otros alimentos. De la estearina se obtiene la manteca vegetal, ingrediente fundamental en la producción de panes, pasteles, galletas y demás productos de repostería.

3.2.2. Industriales

Es utilizado en la fabricación de productos oleoquímicos, como ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, compuestos de nitrógeno graso y glicerol, ingredientes que se utilizan para la producción de jabones, detergentes, lubricantes para pintura, barnices y tinta. Últimamente se ha utilizado el aceite de palma para producir biodiesel.

3.3. Características del aceite crudo de palma proveniente de la extractora Pataxte

En Guatemala se cultiva la palma africana en los departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Quiché, Izabal y el sur de Petén, según las estadísticas del Gremial de Palmicultores de Guatemala (Grepalma). Para la elaboración de esta investigación se utilizó el aceite crudo de palma proporcionado por Naturaceites TM, una de las empresas productoras de aceite de palma más grande de Guatemala, que cuenta con plantaciones de palma africana en los departamentos de Izabal y Petén, y una refinería en el departamento de Escuintla. La muestra que proporcionó Naturaceites TM proviene de la finca extractora Pataxte, ubicada en el Estor, Izabal, cuyas características se describen en la figura 28, el informe de laboratorio con las características del aceite se encuentra en los anexos.

Figura 28. Características del aceite de palma africana

PRUEBA	RESULTADO
Índice de peróxido	3,34 ± 0,19
Índice de yodo	44,5 ± 0,70
Índice de acidez (%)	9,97 ± 0,11
Porcentaje de impurezas insolubles (%)	0,299 ± 0,002
Humedad y materia volátil (%)	0,793 ± 0,008

Fuente: elaboración propia

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Caracterización del asfalto base

El asfalto que se utilizó como base para la modificación con diferentes porcentajes de aceite crudo de palma, es un asfalto tipo AC-20, proporcionado por la empresa ProIn Asphalt, S. A.

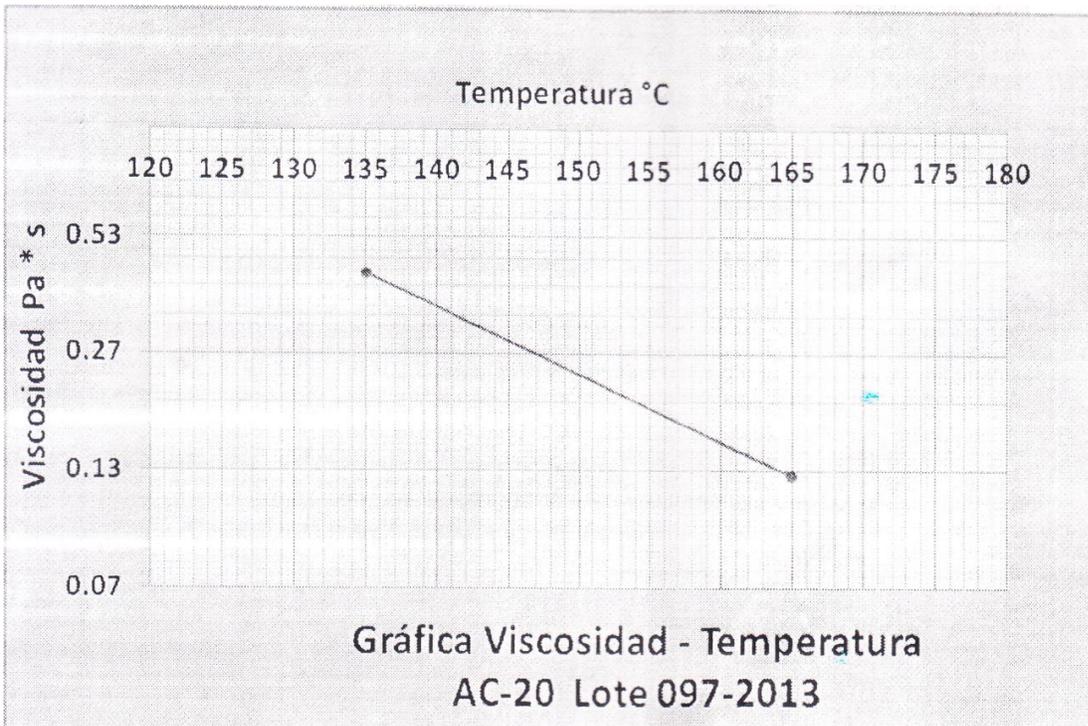
La empresa proporcionó un certificado de calidad del lote de asfalto utilizado, con los resultados de los ensayos de laboratorio que especifica la Norma ASTM D3381 para caracterización de cementos asfálticos por grado de viscosidad, que están resumidos en la tabla II, y una carta reológica, con la viscosidad rotacional a 135 y 165 °C, como se muestra en la figura 29.

Tabla II. **Características del asfalto base según Norma ASTM D3381**

ANÁLISIS	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN ASTM D3381 TABLA 2	MÉTODO ASTM
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 60°F	1,062	N.E.	D70
PESO (Lbs/Gal)	8,738	N.E.	D70
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 77°F	1,058	N.E.	D70
PENETRACIÓN, 77°F, 10g, 5 seg.	86	60 mínimo	D5
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	2 042	2 000 ± 400	D2171
VISCOSIDAD, 275°F, POISES	431	300 mínimo	D2170
FLASH POINT, COC, °F	525	450 mínimo	D92
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °F	114	N.E.	D36
SOLUBILIDAD EN TCE, %	99,98	99,0 mínimo	D2042
ENSAYOS AL RESIDUO TFOT			D1754
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	5 428	10 000 máximo	D2171
DUCTILIDAD, 77°F, 5 cm/minuto	>100	50 mínimo	D113

Fuente: ProIn Asphalt, S. A.

Figura 29. Carta reológica asfalto base AC-20



Fuente: ProIn Asphalt, S. A.

Los resultados del certificado de calidad son con base en una muestra de asfalto tomada en la refinería, pero es muy probable que las características físicas del asfalto se vean alteradas durante la etapa de transporte y manipulación hacia la planta de producción de mezcla asfáltica, por lo que se realizaron de nuevo algunos ensayos en el laboratorio de Asfalgua, para corroborar las características del asfalto muestreado en planta.

Se realizaron los ensayos de viscosidad Brookfield, penetración, punto de ablandamiento y determinación de la gravedad específica a la muestra de asfalto AC-20 sin modificar, para utilizarlos como parámetro de comparación con los resultados de las mismas pruebas en el asfalto modificado con diferentes porcentajes de aceite crudo de palma, los cuales se muestran en la tabla III.

Tabla III. **Resultados de ensayos a asfalto base según Norma ASTM D3381**

ANÁLISIS	RESULTADO
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 77 °F	1,064
PENETRACIÓN, 77 °F, 10g, 5 seg.	66
VISCOSIDAD, 135 °C, Cp	625
VISCOSIDAD, 165 °C, Cp	150
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °C	49

Fuente: elaboración propia.

4.2. Modificación de asfalto con aceite crudo de palma

Se modificó el asfalto base con diferentes porcentajes de aceite crudo de palma para determinar la variación de las características físicas del asfalto con la adición del aceite.

4.2.1. Dosificaciones utilizadas

Se utilizaron dosificaciones de aceite crudo de palma desde 0,5 % en peso, hasta llegar a 3,0 %, con incrementos de 0,5 %, para lograr medir la influencia de la cantidad de aceite de palma en las características físicas de asfalto.

En la tabla IV se muestran los resultados de los ensayos realizados al asfalto sin modificar y al asfalto modificado con los diferentes porcentajes de aceite de palma.

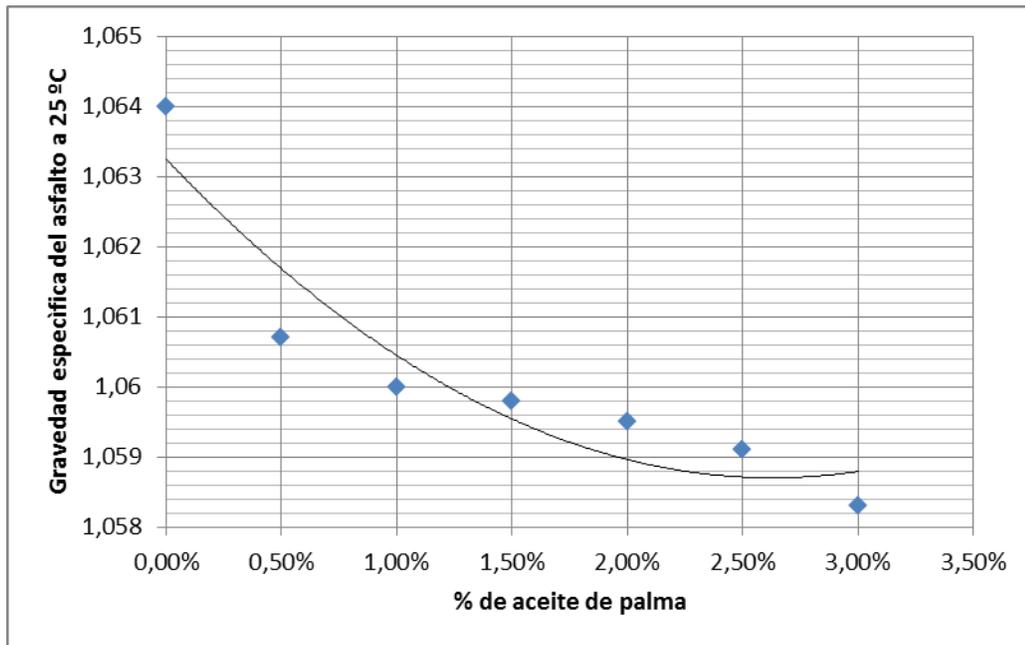
Tabla IV. **Resultados de ensayos a asfalto modificado con aceite crudo de palma según Norma ASTM D3381**

ANÁLISIS	CONTENIDO DE ACEITE CRUDO DE PALMA						
	0,00 %	0,50 %	1,00 %	1,50 %	2,00 %	2,50 %	3,00 %
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 77 °F	1,064	1,0607	1,0600	1,0598	1,0595	1,0591	1,0583
PENETRACIÓN, 77 °F, 100g, 5 seg	66	73	86	90	95	98	104
VISCOSIDAD 135 °C	625	575	520	495	475	447.5	432.5
VISCOSIDAD 165 °C	150	140	132.5	130	127.5	120	117.5
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °C	49	48,4	47,9	47,6	47,2	45,1	44,6

Fuente: elaboración propia.

Para visualizar la influencia del aceite de palma en las propiedades del asfalto, los resultados fueron graficados en función del porcentaje de aceite de palma agregado, los cuales se muestran en las figuras 20 a 34.

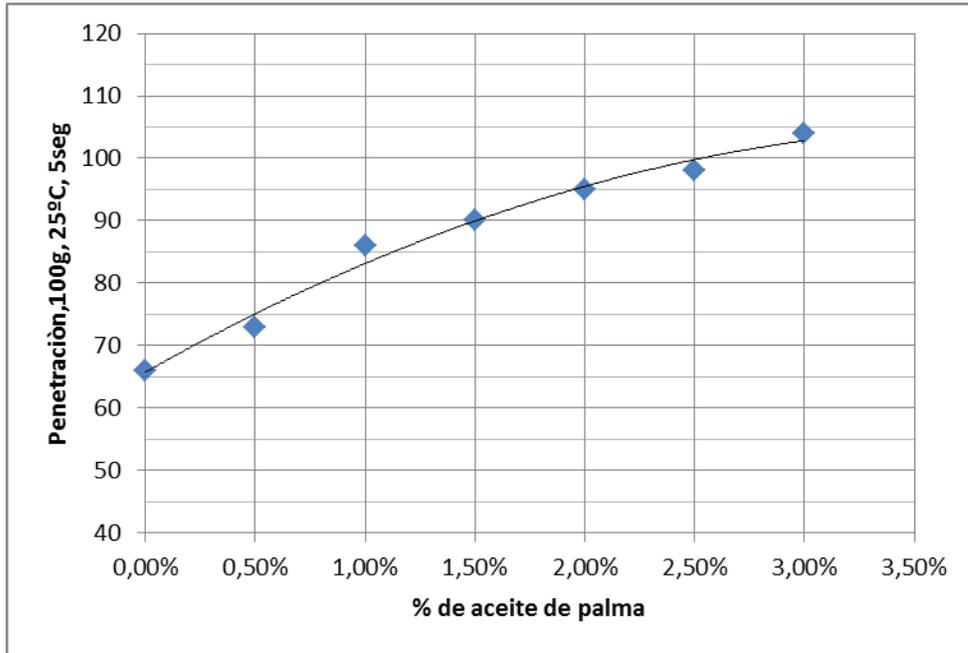
Figura 30. **Gravedad específica del asfalto *versus* porcentaje de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

La gravedad específica del asfalto disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aceite de palma agregado, esto se debe a que el aceite de palma al ser menos denso que el asfalto, incrementa en mayor proporción el volumen que el peso total de la mezcla, como consecuencia, la gravedad específica resultante es menor.

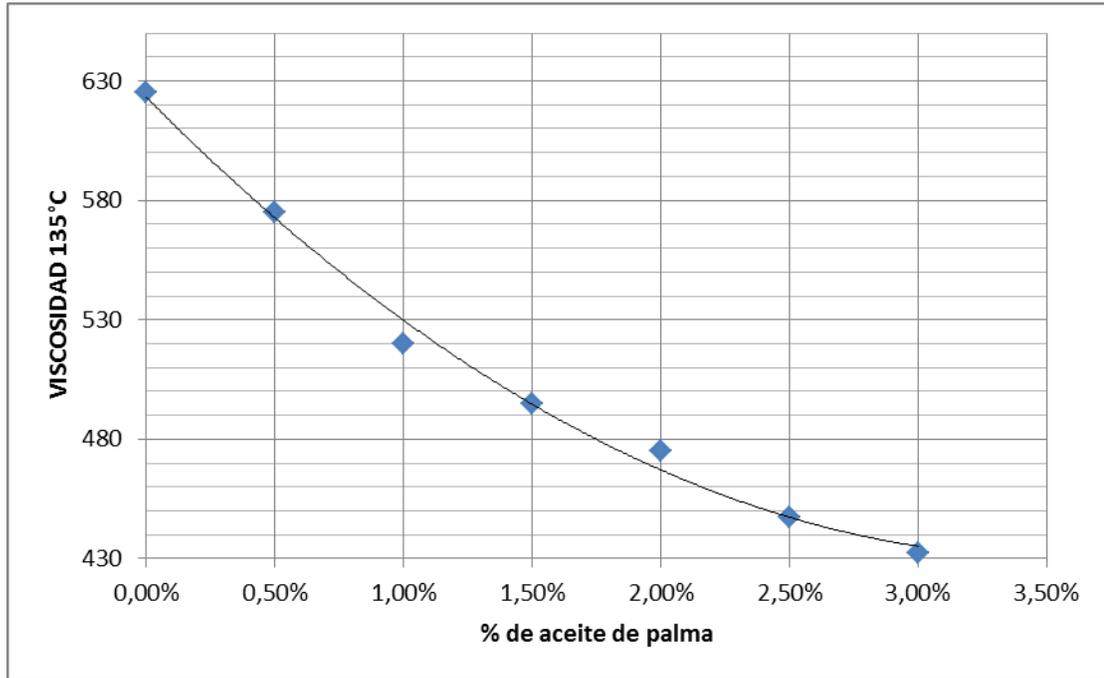
Figura 31. Penetración *versus* porcentaje de aceite de palma



Fuente: elaboración propia.

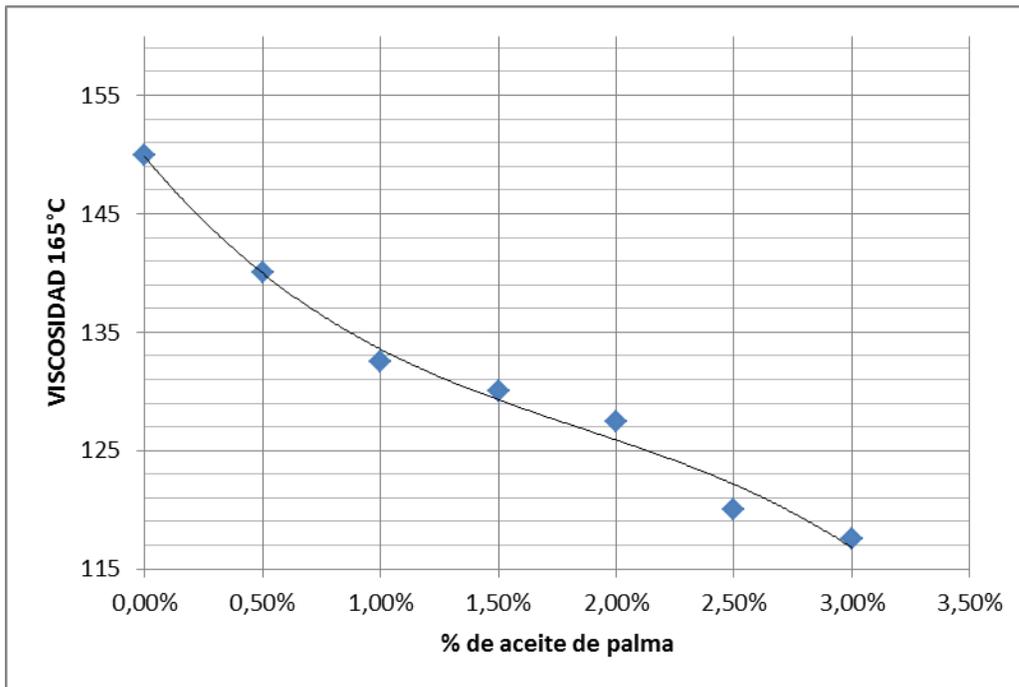
El valor de la penetración aumenta con el incremento del porcentaje de aceite de palma agregado, lo que indica, como es de esperar, que el aceite de palma vuelve más blando al asfalto.

Figura 32. **Viscosidad cinemática a 135 °C versus porcentaje de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

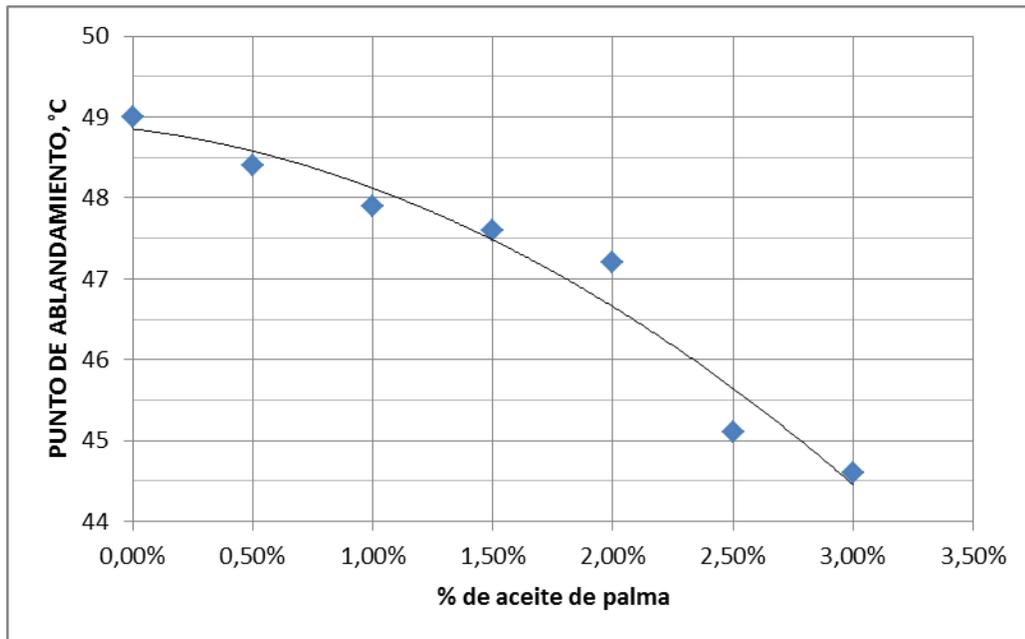
Figura 33. **Viscosidad cinemática a 165 °C versus porcentaje de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

La viscosidad del asfalto disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aceite de palma, lo que demuestra que puede ser utilizado como reductor de viscosidad en el asfalto.

Figura 34. **Punto de ablandamiento en °C versus porcentaje de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

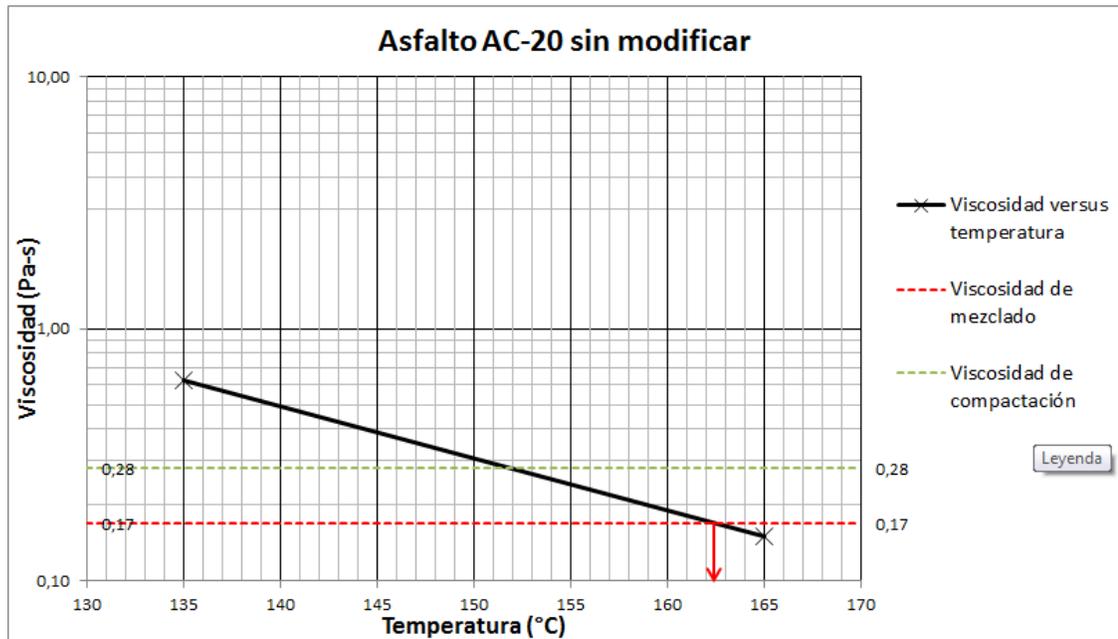
El asfalto con aceite de palma al ser más blando, tiene un punto de ablandamiento más bajo a medida que se aumenta el porcentaje de aceite de palma, lo cual puede afectar el comportamiento del asfalto en la mezcla asfáltica si las temperaturas de servicio del asfalto son altas.

4.2.2. Construcción de curvas viscosidad *versus* temperatura

Las curvas de viscosidad *versus* temperatura sirven para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. Para elaborar las curvas de viscosidad *versus* temperatura se determinó la viscosidad del asfalto a temperaturas de 135 °C y 165 °C utilizando el viscosímetro rotacional Brookfield.

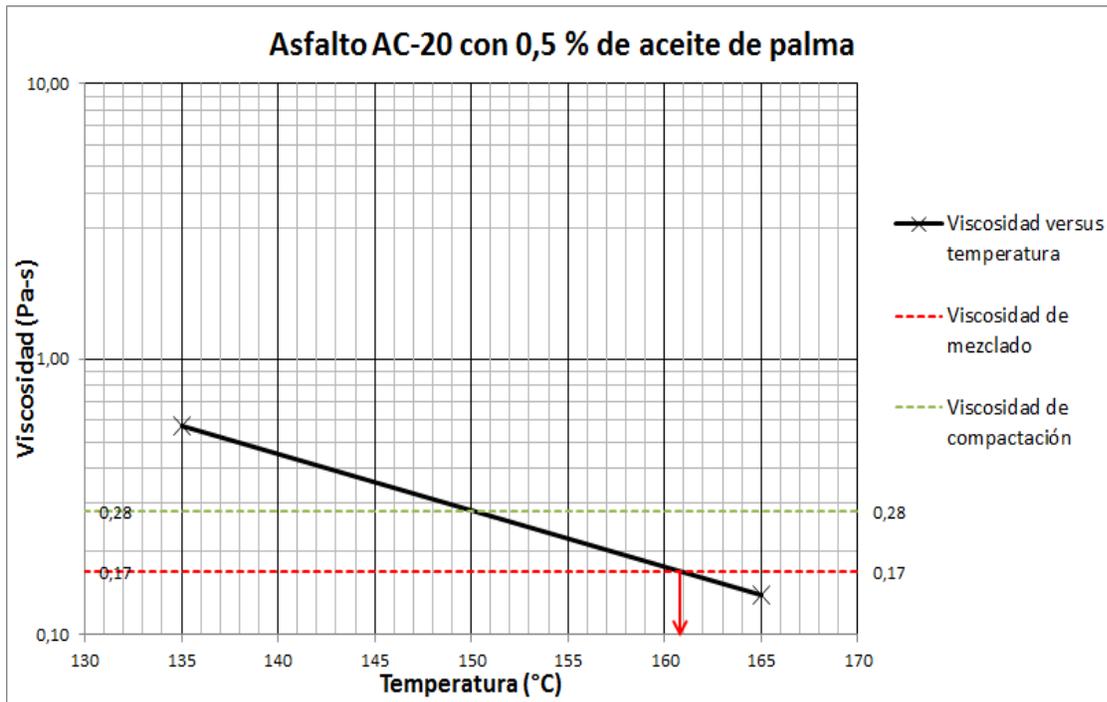
Obtenidos los valores de viscosidad a las temperaturas establecidas, se procede a la construcción de la gráfica, colocando en el eje de las ordenadas la viscosidad en pascales por segundo (Pa-s) y en el eje de las abscisas la temperatura en °C, utilizando una escala logarítmica. La gráfica resultante es una línea recta con pendiente negativa. Las curvas de viscosidad *versus* temperatura se muestran en las gráficas de la figura 35 a la 41.

Figura 35. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 sin modificar**



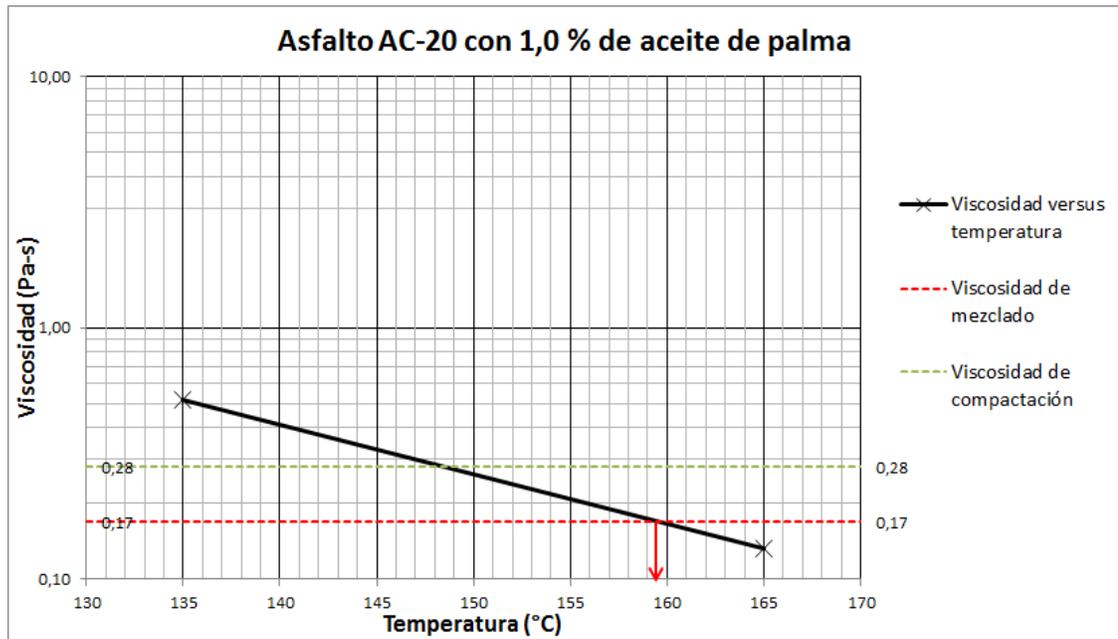
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 0,5 % de aceite de palma**



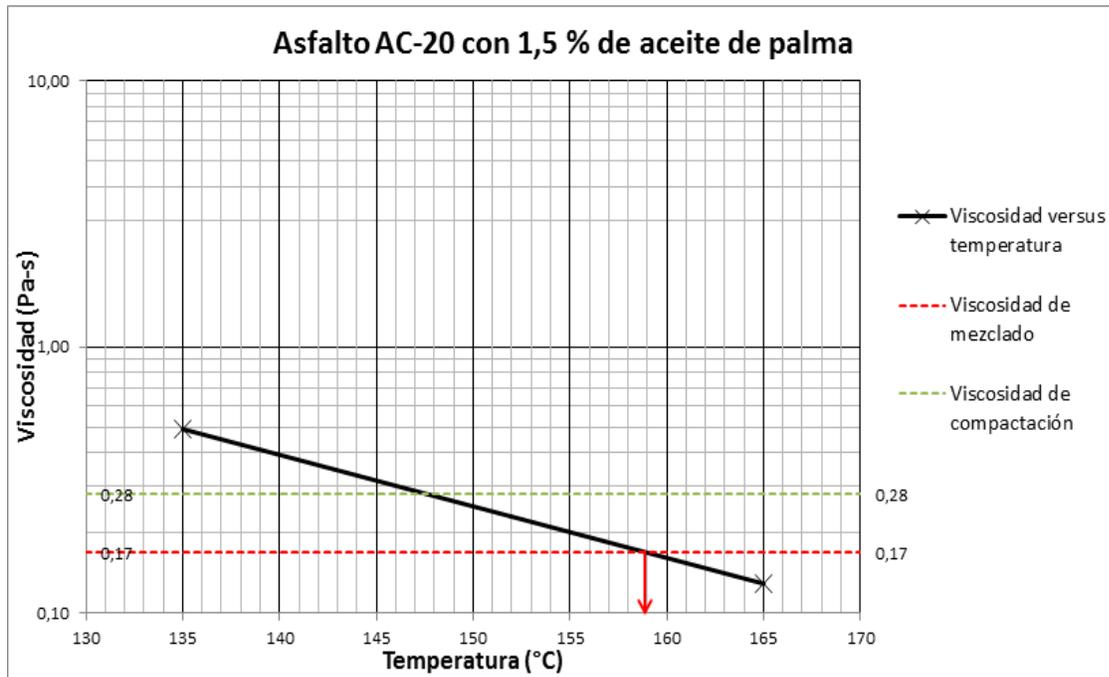
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 1,0 % de aceite de palma**



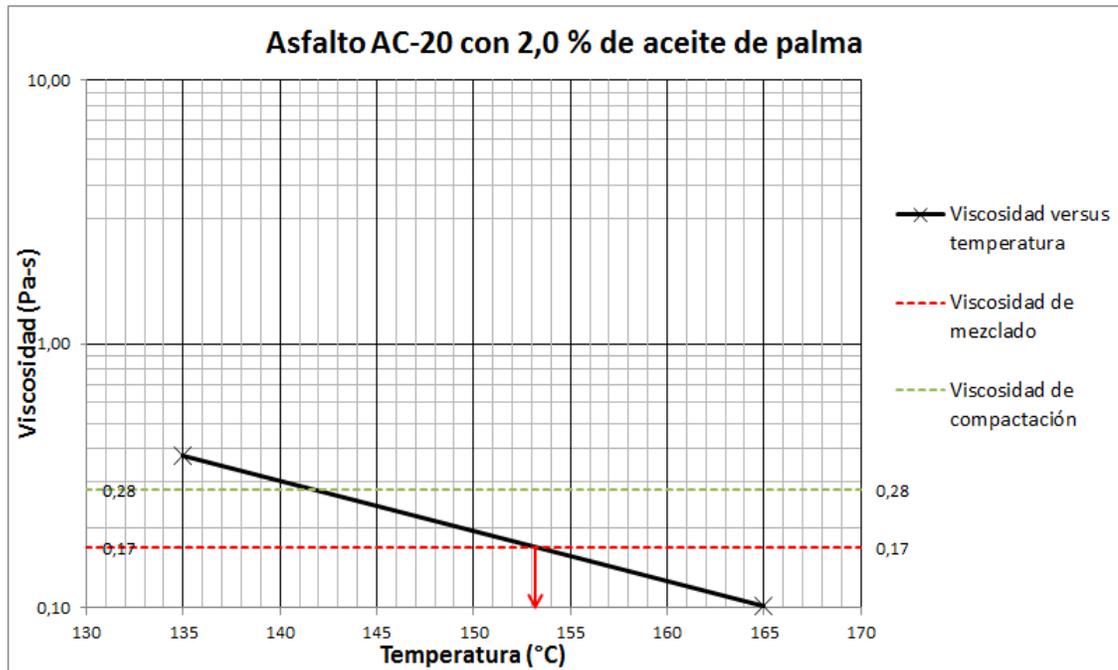
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 1,5 % de aceite de palma**



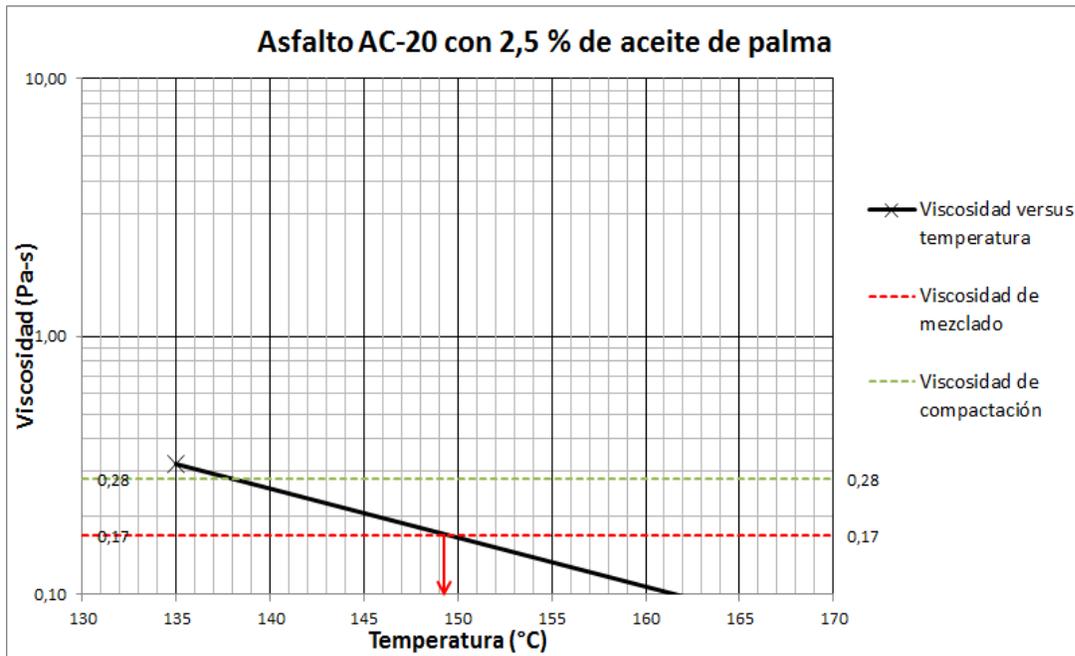
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 2,0 % de aceite de palma**



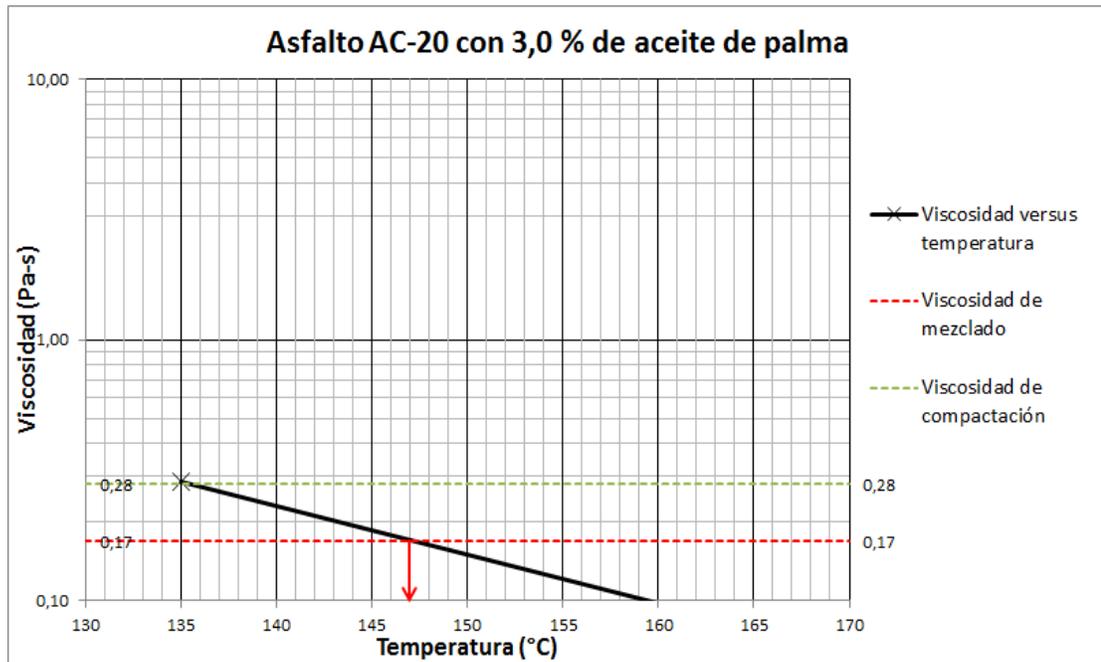
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 2,5 % de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfica de viscosidad versus temperatura de asfalto AC-20 modificado con 3,0 % de aceite de palma**



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Determinación de temperaturas de mezclado y compactación

Las temperaturas de mezclado y compactación se determinan a partir de los rangos de viscosidad que debe tener el cemento asfáltico para mezclado y compactación establecidos en el método Marshall de diseño de mezcla asfáltica.

La temperatura de mezclado es aquella en la que el asfalto tiene una viscosidad de $0,17 \pm 0,02$ Pa-s y la de compactación es la temperatura a la que el asfalto tiene una viscosidad de $0,28 \pm 0,03$ Pa-s.

Las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto con aceite de palma se obtuvieron de forma gráfica utilizando las curvas de viscosidad *versus* temperatura para cada asfalto. Las temperaturas de mezclado y compactación corresponden al valor donde la gráfica trazada anteriormente intersecta los valores de $0,17$ Pa-s y $0,28$ Pa-s respectivamente. Las temperaturas de mezclado y compactación de cada asfalto se muestran en la tabla V.

Tabla V. **Temperaturas de mezclado y compactación para el asfalto base y el asfalto modificado con diferentes porcentajes de aceite de palma**

ASFALTO	Temperatura de mezclado (°C)	Temperatura de mezclado (°F)	Temperatura de compactación (°C)	Temperatura de compactación (°F)
AC-20 SIN MODIFICAR	162,50	324,50	152,00	305,60
AC-20 + 0,5 % DE ACP	161,00	321,80	150,00	302,00
AC-20 + 1,0 % DE ACP	159,50	319,10	148,00	298,40
AC-20 + 1,5 % DE ACP	159,00	318,20	147,50	297,50
AC-20 + 2,0 % DE ACP	154,00	309,20	141,50	286,70
AC-20 + 2,5 % DE ACP	149,00	300,20	138,00	280,40
AC-20 + 3,0 % DE ACP	147,00	296,60	135,00	275,00

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Determinación de contenido de aceite de palma a utilizar

A partir de las temperaturas de mezclado y compactación calculadas, se decidió utilizar el asfalto con 2,0 %, 2,5 % y 3,0 % de aceite de palma para la elaboración de las probetas de mezcla para ser comparadas con la mezcla patrón.

4.3. Caracterización de los agregados minerales para una mezcla de graduación D (19 mm)

La Dirección General de Caminos (DGC), en las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*, clasifica las mezclas asfálticas según el tamaño máximo nominal del agregado mineral, que es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamiz que retenga más del 10 % del

agregado combinado. Para cada tipo de mezcla la DGC asigna límites mínimos y máximos para los porcentajes que pasan cada tamiz según la Normas AASHTO T27 y T11, como se muestra en la figura 42.

Figura 42. **Graduaciones designadas para cada tipo de mezcla según la Dirección General de Caminos**

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Sección 401. p. 3.

Para el desarrollo experimental fue seleccionada la mezcla tipo D, que se utiliza comúnmente en carreteras de tránsito pesado. Se utilizó la combinación de agregado grueso, medio y fino en las proporciones adecuadas para cumplir con la granulometría que especifica la DGC.

4.3.1. Agregado grueso

El que se utilizó fue un agregado triturado de origen basáltico, muestreado de la bodega de materiales de la planta de Asfalgua y proveniente de la planta Palín Oeste de Agreca, con una graduación de 1" a núm. 56, que cumple con

los requisitos establecidos en las especificaciones de la DGC, como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. **Resumen de resultados agregado de 1” a núm. 56**

PRUEBA	NORMA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
Abrasión en máquina de Los Ángeles	AASHTO T96	35 % máximo	18,46 %
Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos)	AASHTO T104	12 % máximo	1,78 %
Caras fracturadas: 1 cara fracturada	-	90 % máximo	100 %
Caras fracturadas: 2 caras fracturadas	-	75 % máximo	100 %
Partículas planas o alargadas	ASTM D 4791	8 % máximo	2,80 %

Fuente: elaboración propia.

Los informes de laboratorio de cada prueba realizada al agregado grueso, así como el análisis granulométrico se incluyen en los anexos.

4.3.2. Agregado medio

El que se utilizó fue un agregado triturado de origen basáltico, muestreado de la bodega de materiales de la planta de Asfalgua y proveniente de la planta Palín Oeste de Agreca, con una graduación de 3/8” a núm. 8, que cumple con los requisitos establecidos en las especificaciones de la DGC, como se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. **Resumen de resultados agregado de 3/8” a núm. 8**

PRUEBA	NORMA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
Abrasión en máquina de Los Ángeles	AASHTO T96	35 % máximo	16,62 %
Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos)	AASHTO T104	12 % máximo	3,82 %
Caras fracturadas: 1 cara fracturada	-	90 % máximo	100 %
Caras fracturadas: 2 caras fracturadas	-	75 % máximo	100 %
Partículas planas o alargadas	ASTM D 4791	8 % máximo	2,80 %

Fuente: elaboración propia.

Los informes de laboratorio de cada prueba realizada al agregado medio, así como el análisis granulométrico se incluyen en los anexos.

4.3.3. Agregado fino

El que se utilizó fue un agregado triturado de origen basáltico, muestreado de la bodega de materiales de la planta de Asfalga y proveniente de la planta Palín Oeste de Agreca, con una graduación de 1/4” a 0, que cumple con los requisitos establecidos en las especificaciones de la DGC, como se muestra en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Resumen de resultados agregado de 1/4” a 0**

PRUEBA	NORMA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
Equivalente de arena	AASHTO T176	35 % mínimo	81,00 %
Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos)	AASHTO T104	12 % máximo	3,33 %
Índice plástico	AASHTO T90	4 % máximo	0 %

Fuente: elaboración propia.

Los informes de laboratorio de cada prueba realizada al agregado fino, así como el análisis granulométrico se incluyen en los anexos.

4.3.4. Combinación de agregados

El agregado grueso, medio y fino deben combinarse en proporciones que garanticen una granulometría que cumpla con los límites mínimos y máximos de la curva granulométrica de una mezcla tipo D. Las proporciones utilizadas de cada agregado dependen de la granulometría individual de cada uno. Las proporciones que se utilizaron para la combinación de agregados en este diseño de mezcla se muestran en la tabla IX.

Tabla IX. **Proporciones para combinación de agregados**

AGREGADO	GRADUACIÓN	PROPORCIÓN
GRUESO	1" a núm. 56	30 %
MEDIO	3/8" a núm. 8	30 %
FINO	1/4" a 0	40 %

Fuente: elaboración propia.

4.4. Diseño de mezcla según método Marshall

Es un método de diseño de mezclas asfálticas en caliente, formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, y mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, con el que se determina experimentalmente el contenido óptimo de asfalto para determinada combinación de agregados.

El método consiste en evaluar las propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica utilizando diferentes porcentajes de asfalto, compactada en probetas de 4" de diámetro y 2½" de altura. Las probetas son preparadas según el procedimiento para calentar, mezclar y compactar mezcla asfáltica en laboratorio descrito en la Norma ASTM D1559.

Figura 43. **Probetas utilizadas para diseño de mezclas por método Marshall**



Fuente: Laboratorio ASFALGUA

4.4.1. Mezcla patrón con asfalto convencional

Para el diseño de mezcla tipo D con asfalto convencional, se elaboraron juegos de 3 probetas con porcentajes de asfalto de 3,5, 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 y 6,0 % cada juego, y se calcularon las propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia de cada probeta, tomando el promedio de los resultados obtenidos como resultado final. Las probetas fueron mezcladas a 320 °F y compactadas a

300 °F, aplicando 75 golpes por cara. Los informes de laboratorio de los ensayos realizados para el diseño de mezcla se incluyen en los anexos.

4.4.1.1. Gravedad específica bruta de la mezcla (Gmb)

La gravedad específica bruta de la mezcla utiliza el volumen bruto de la probeta, tomando en cuenta el volumen de los vacíos de aire en la mezcla. Se calcula experimentalmente, según el procedimiento de la Norma AASHTO T166. El método consiste en pesar cada probeta al aire (peso seco), luego se sumergen en agua durante 3 a 5 minutos y se pesan (peso sumergido en agua), finalmente se retiran las probetas del agua y se secan superficialmente antes de pesarlas (peso superficie seco saturada). La gravedad específica bruta se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde:

Gmb = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada

A = peso de la probeta al aire

B = peso de la probeta con superficie seco saturada

C = peso de la probeta sumergida en agua

Se calculó la gravedad específica bruta de cada probeta, tomando el promedio de resultados para cada porcentaje de asfalto utilizado. Los resultados se muestran en la tabla X.

Tabla X. **Gravedad específica bruta de la mezcla (Gmb) en función del porcentaje de asfalto**

Gmb	
% de AC	Promedio
4,0	2,3611
4,5	2,3868
5,0	2,4081
5,5	2,4114
6,0	2,4166

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.2. **Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm)**

La gravedad específica teórica máxima de la mezcla considera el volumen de la mezcla sin vacíos de aire, y se calcula siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM D2071, también conocido como método RICE.

La gravedad específica teórica máxima también se puede calcular a partir de la gravedad específica efectiva de los agregados (Gse), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$Gmm = \frac{100}{\left(\frac{100 - Pb * 100}{Gse} - \frac{Pb * 100}{Gb} \right)}$$

Donde:

Gmm = gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica compactada

Pb = porcentaje de asfalto en la mezcla

Gse = gravedad específica efectiva del agregado

Gb = gravedad específica del asfalto

La tabla XI muestra la gravedad específica máxima teórica de las probetas utilizadas para el diseño de mezcla. Las gravedades específicas teóricas máximas que se muestran en la tabla fueron determinadas mediante la fórmula anterior.

Tabla XI. **Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm) en función del porcentaje de asfalto**

Gmm	
% de AC	Promedio
4,0	2,5204
4,5	2,5025
5,0	2,4849
5,5	2,4676
6,0	2,4505

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.3. **Porcentaje de vacíos de aire (Va)**

Los vacíos de aire en la mezcla consisten en los espacios de aire entre cada partícula de agregado cubierta de asfalto. El porcentaje de vacíos de aire puede calcularse fácilmente a partir de la gravedad específica bruta y gravedad específica máxima teórica de la mezcla. El porcentaje de vacíos de aire se calcula con la siguiente fórmula:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Donde:

Va = porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada

Gmm = gravedad específica máxima teórica de la mezcla

Gmb = gravedad específica bruta de la mezcla

Los porcentajes de vacíos de aire de las probetas utilizadas para el diseño de mezcla se muestran en la tabla XII, en función del contenido de asfalto de cada probeta.

Tabla XII. **Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla (Va) en función del porcentaje de asfalto**

Va	
% de AC	Promedio %
4,0	6,32
4,5	4,63
5,0	3,09
5,5	2,28
6,0	1,38 %

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.4. **Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)**

Es el porcentaje de asfalto que es absorbido por los poros del agregado mineral permeables al asfalto, se expresa como un porcentaje de la masa del agregado y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b$$

Donde:

P_{ba} = porcentaje de asfalto absorbido

G_{sb} = gravedad específica bruta del agregado

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

4.4.1.5. Porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

Es el porcentaje total de asfalto en la mezcla menos el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado y es el asfalto que forma la capa que cubre cada partícula de agregado en la mezcla. Se calcula mediante:

$$P_{be} = P_b - P_{ba}$$

Donde:

P_{be} = porcentaje de asfalto efectivo

P_b = porcentaje de asfalto total en la mezcla

P_{ba} = porcentaje de asfalto absorbido

La tabla XIII muestra el porcentaje de asfalto efectivo en la mezcla, en función del porcentaje total de asfalto de cada probeta.

Tabla XIII. **Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) en función del porcentaje de asfalto**

Pbe	
% de AC	Promedio
4,0	3,79
4,5	4,29
5,0	4,79
5,5	5,29
6,0	5,79

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.6. **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Los vacíos en el agregado mineral es el volumen de los vacíos entre cada partícula de agregado, incluyendo el volumen del asfalto efectivo. Se expresa como porcentaje del volumen total y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Donde:

VMA = porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Gmb = gravedad específica bruta de la mezcla

Ps = porcentaje de agregado en función de la masa de la mezcla total

Gsb = gravedad específica bruta del agregado

La tabla XIV contiene el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, en función del porcentaje de asfalto de cada probeta.

Tabla XIV. **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) en función del porcentaje de asfalto**

VMA	
% de AC	Promedio
4,0	14,73
4,5	14,25
5,0	13,94
5,5	14,27
6,0	14,54

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.7. **Porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA)**

Es el porcentaje de vacíos del agregado mineral llenados con asfalto, sin tomar en cuenta el asfalto absorbido, como porcentaje del VMA, se determina usando:

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde:

VFA = porcentaje de vacíos llenados con asfalto

VMA = porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Va = porcentaje de vacíos de aire en la mezcla

El porcentaje de vacíos llenados con asfalto se muestra en la tabla XV, en función del porcentaje de asfalto de cada probeta.

Tabla XV. **Porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) en función del porcentaje de asfalto**

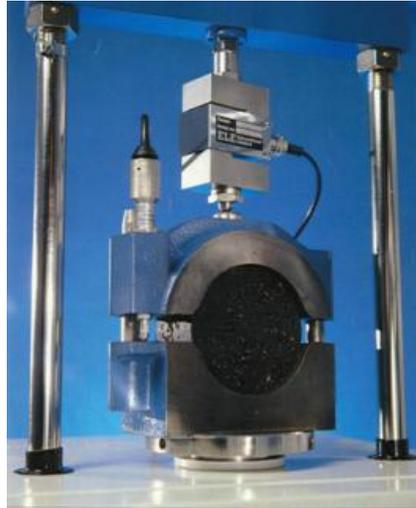
VFA	
% de AC	Promedio
4,0	57,09
4,5	67,54
5,0	77,81
5,5	84,07
6,0	90,49

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.8. Estabilidad Marshall

Es la carga máxima que puede resistir una probeta sin que se produzca la falla. Para medir la estabilidad de una probeta se utiliza la prensa Marshall, mostrada en la figura 44. El ensayo de estabilidad se realiza según la Norma AASHTO T245.

Figura 44. **Prensa de estabilidad Marshall**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. p. 76.

La estabilidad de las probetas utilizadas para el diseño de mezcla, se muestran en la siguiente tabla, expresada en libras y en función del porcentaje de asfalto utilizado.

Tabla XVI. **Estabilidad en libras de en función del porcentaje de asfalto**

Estabilidad	
% de AC	Promedio
4,0	2 264,72
4,5	2 254,00
5,0	2 243,09
5,5	2 208,00
6,0	2 176,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.9. Fluencia Marshall

Medida en centésimas de pulgada, es la deformación o reducción de diámetro de la probeta de mezcla en el momento en que la probeta alcanza la carga de estabilidad Marshall. La fluencia se mide al momento de realizar el ensayo de estabilidad Marshall, y su procedimiento se establece también en la Norma AASTO T245.

La tabla XVII muestra la fluencia Marshall de las probetas utilizadas para el diseño de mezcla, en función del porcentaje de asfalto.

Tabla XVII. **Fluencia Marshall en función del porcentaje de asfalto**

Fluencia	
% de AC	Promedio
4,0	11,03
4,5	9,67
5,0	11,07
5,5	14,30
6,0	14,33

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.10. Relación estabilidad/fluencia (REF)

La relación estabilidad/fluencia, como su nombre lo indica, es la razón entre la estabilidad y la fluencia, y sirve para ilustrar la rigidez de la mezcla asfáltica en caliente. La tabla XVIII muestra los resultados de la relación estabilidad/fluencia, en función del porcentaje de asfalto.

Tabla XVIII. **Relación estabilidad/fluencia en función del porcentaje de asfalto**

REF	
% de AC	Promedio
4,0	205,26
4,5	218,09
5,0	202,69
5,5	161,93
6,0	158,08

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.11. Relación Filler/ Betún (F/B)

Es la relación entre el porcentaje de material que pasa el tamiz núm. 200 y el porcentaje de asfalto efectivo y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F/B = * \frac{\%Pasa\ No.\ 200}{Pbe}$$

Donde:

F/B = relación Filler/Betún

% Pasa núm. 200 = porcentaje en masa de agregado que pasa el tamiz núm. 200

Pbe = porcentaje de asfalto efectivo

Tabla XIX. **Relación Filler/Betún (F/B) en función del porcentaje de asfalto**

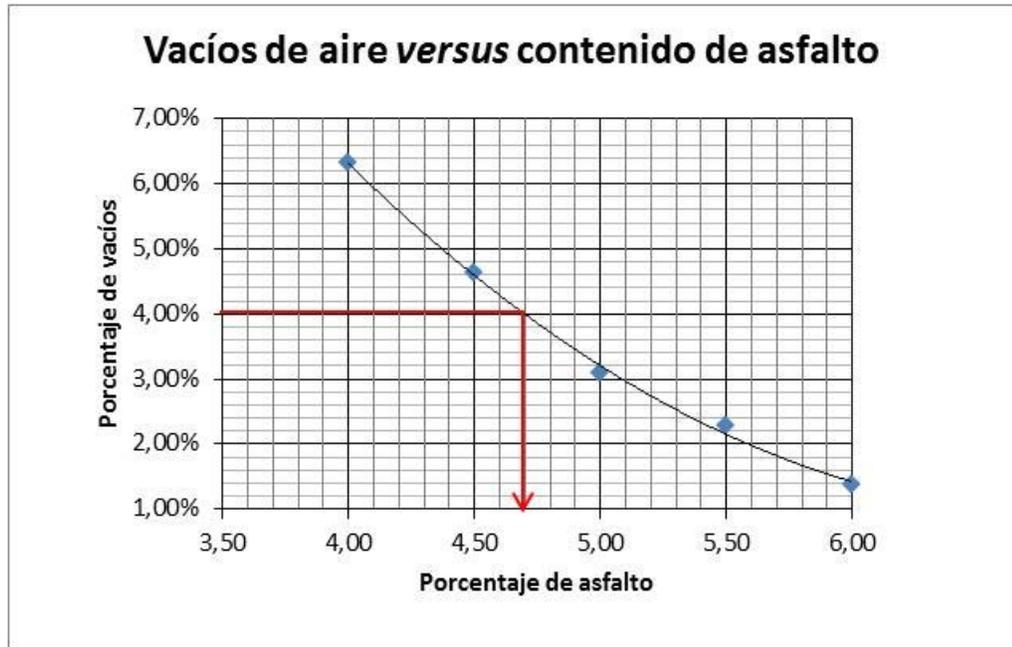
F/B	
% de AC	Promedio
4,0	1,61
4,5	1,42
5,0	1,27
5,0	1,15
6,0	1,05

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.12. Selección del porcentaje óptimo de asfalto

Para seleccionar el porcentaje óptimo de asfalto para la combinación de agregados utilizada, es necesario graficar los resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla, la estabilidad y fluencia de la mezcla en función del porcentaje de asfalto. Luego, utilizando el grafico de vacíos de aire *versus* porcentaje de asfalto, se determina el porcentaje de asfalto para el cual el porcentaje de vacíos es de 4,0 % (el punto medio entre 3 y 5 % que sugiere la especificación), como se muestra en la figura 45.

Figura 45. Gráfico vacíos de aire (V_a) versus porcentaje de asfalto



Fuente: elaboración propia.

En este caso, el porcentaje de asfalto que produce un 4,0 % de vacíos en la mezcla es de 4,7 %, este debe ser evaluado y comparado con los valores establecidos en especificaciones de la DGC (tablas XX y XXI), para cada propiedad de la mezcla.

Tabla XX. **Requisitos para la mezcla asfáltica en caliente**

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 %	

⁽¹⁾ El porcentaje de vacíos con aire se basa en AASHTO T 166, AASHTO T 209 y AASHTO T 269.

⁽²⁾ Cuando se establezca en las Disposiciones Especiales, los especímenes podrán ser preparados usando el compactador giratorio aplicando las mismas especificaciones de compactación indicadas más adelante para mezclas Superpave.

⁽³⁾ Este valor deberá calcularse en función de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada determinada directamente conforme el ensayo Rice-AASHTO T 209.

⁽⁴⁾ La razón polvo-asfalto se define como el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 micrómetros dividido por el contenido efectivo de asfalto calculado por masa de mezcla.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Sección 401. p. 7.

Tabla XXI. **Tabla 401-3 de las especificaciones de la DGC para valores del porcentaje de vacíos del agregado mineral, según el porcentaje de vacíos en la mezcla**

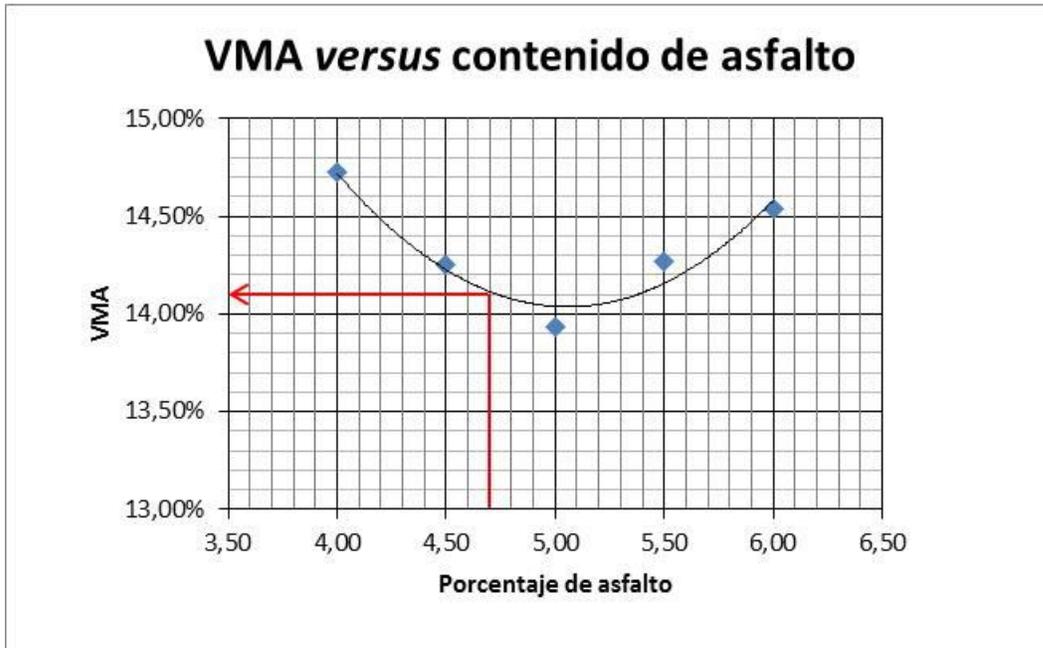
Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
9.50	14	15	16	15
12.50	13	14	15	14
19.00	12	13	14	13
25.00	11	12	13	12
37.50	10	11	12	11
50.00	9.5	10.5	11.5	No aplicable

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

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Sección 401. p. 8.

Para 4,70 % de asfalto, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral en la mezcla es de 14,10 %, como se muestra en la figura 46.

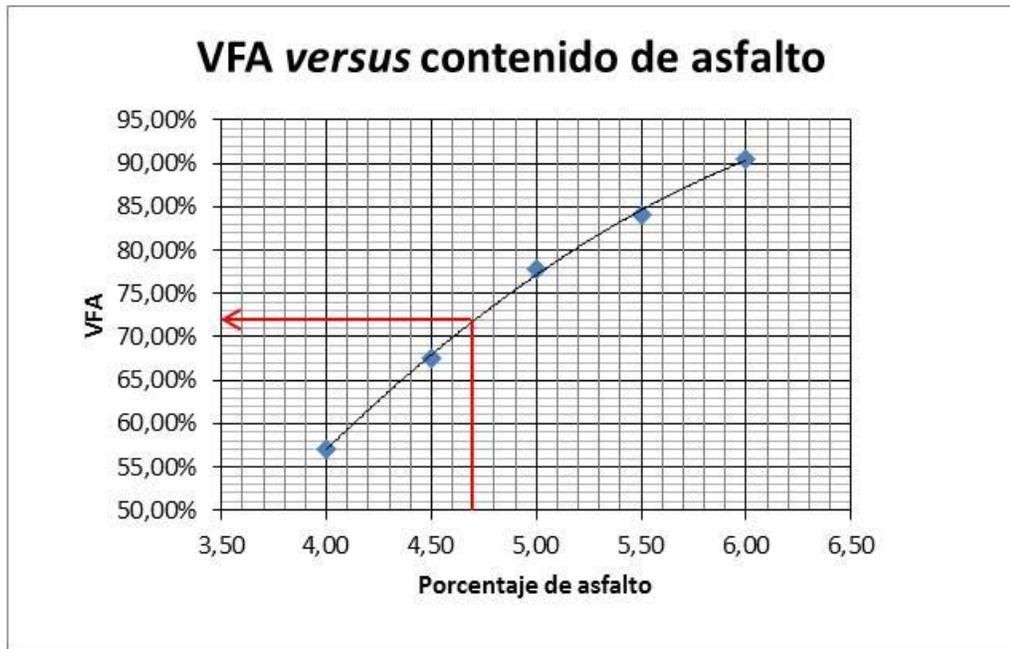
Figura 46. **Gráfico vacíos en el agregado mineral (VMA) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de vacíos llenados con asfalto para 4,70 % de asfalto es de 72,0 %, que cumple con los valores establecidos en la especificación.

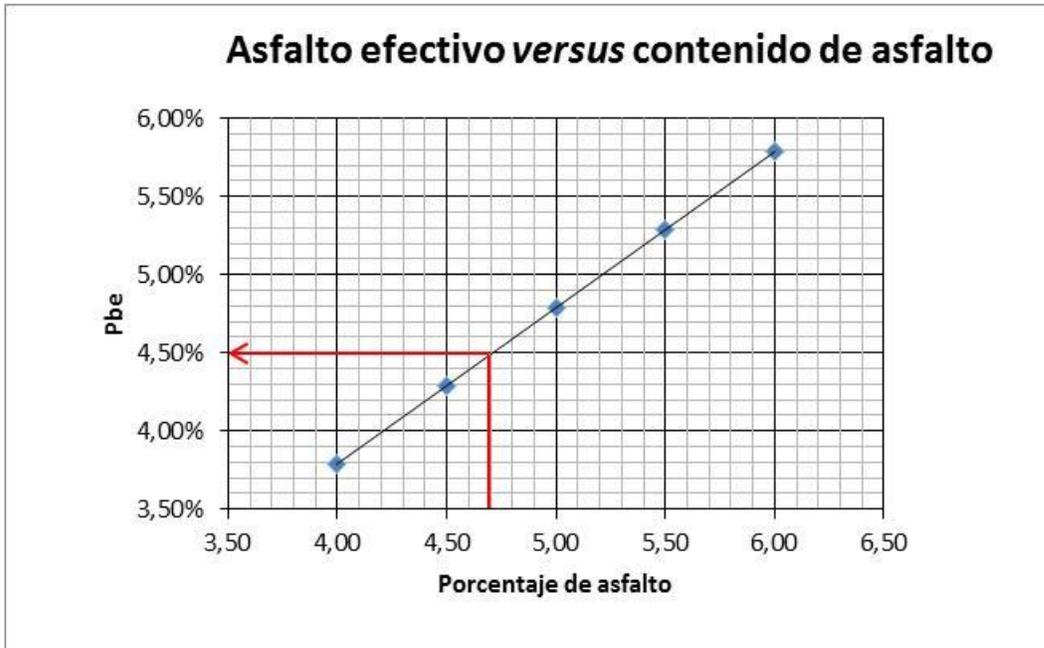
Figura 47. **Gráfico vacíos llenados con asfalto (VFA) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de asfalto efectivo, para un porcentaje de asfalto de 4,70 %, es de 4,50 % como se muestra en la figura 48.

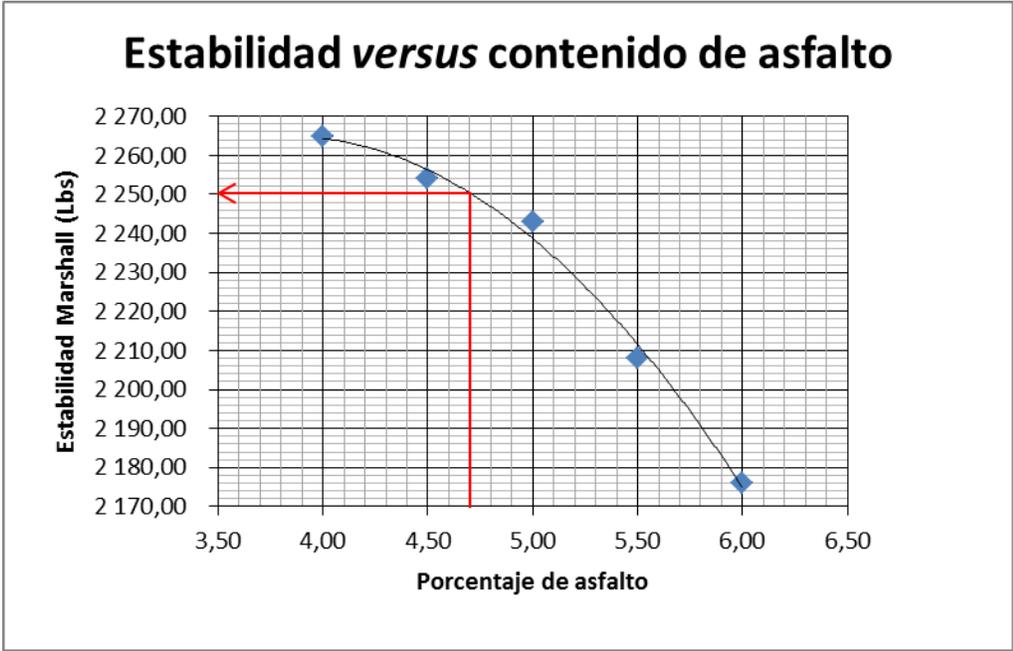
Figura 48. **Gráfico porcentaje de asfalto efectivo (Pbe) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

La figura 49 muestra el gráfico de la estabilidad Marshall *versus* el porcentaje de asfalto, donde se puede observar que para un 4,70 % de asfalto, la carga de estabilidad es de 2 250 Lbs.

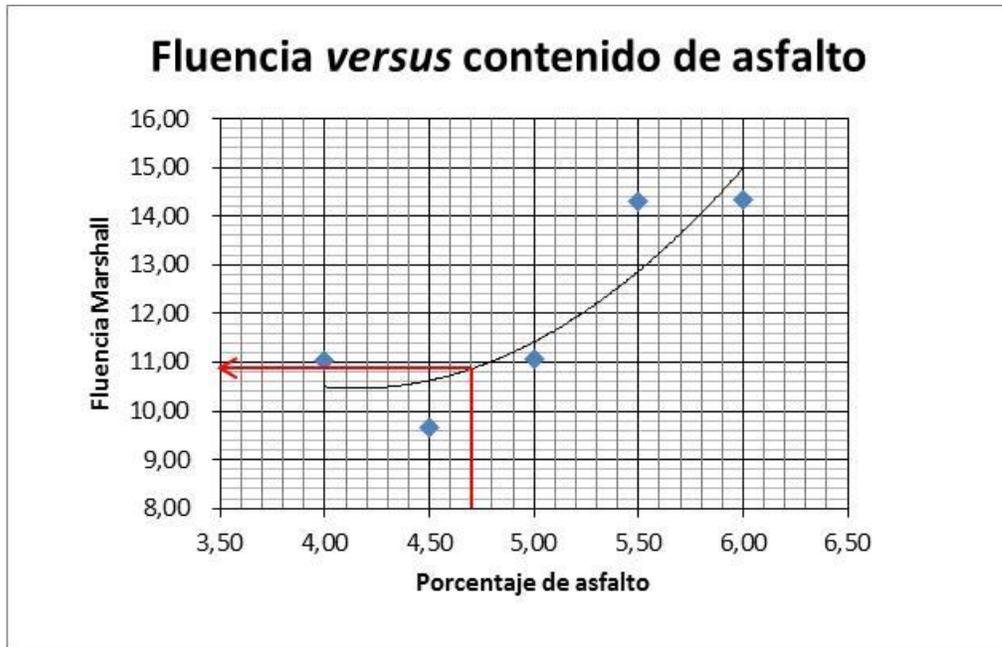
Figura 49. Gráfico estabilidad Marshall (E) versus porcentaje de asfalto



Fuente: elaboración propia.

El valor de fluencia Marshall de la mezcla para 4,70 % de asfalto es de 10,9, como se muestra en la figura 50.

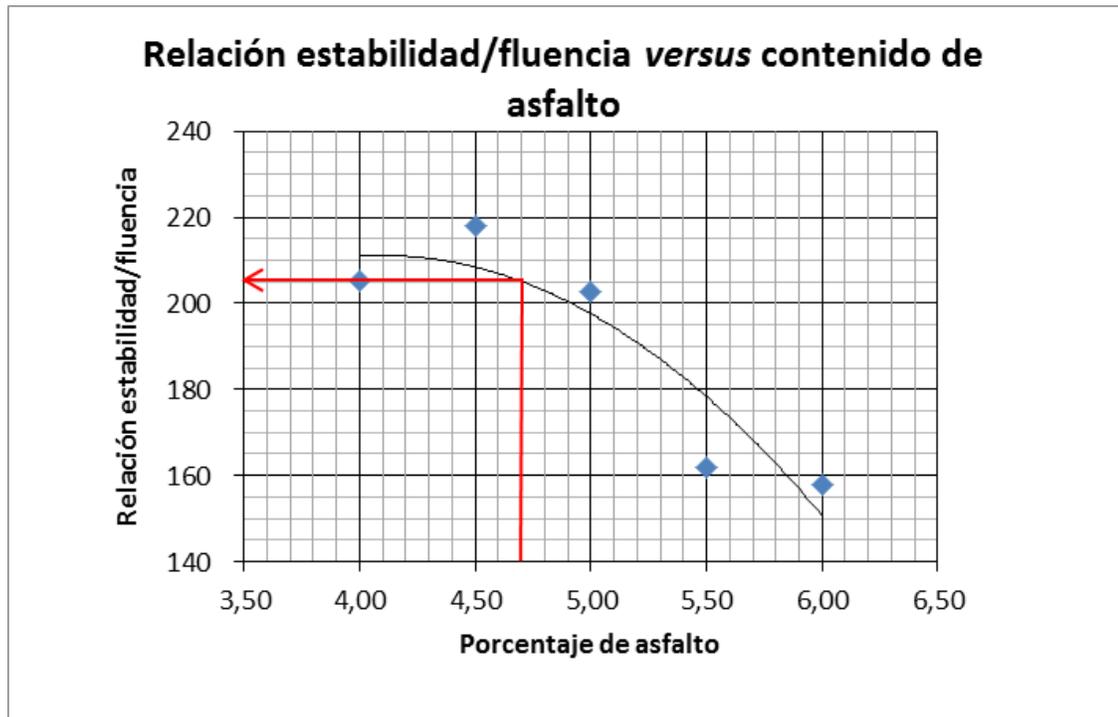
Figura 50. Gráfico fluencia Marshall versus porcentaje de asfalto



Fuente: elaboración propia.

La relación estabilidad/fluencia es de 206, lo que está dentro del rango de 120-275 que establece la especificación. La figura 51 muestra el gráfico de la relación estabilidad/fluencia, en función del porcentaje de asfalto.

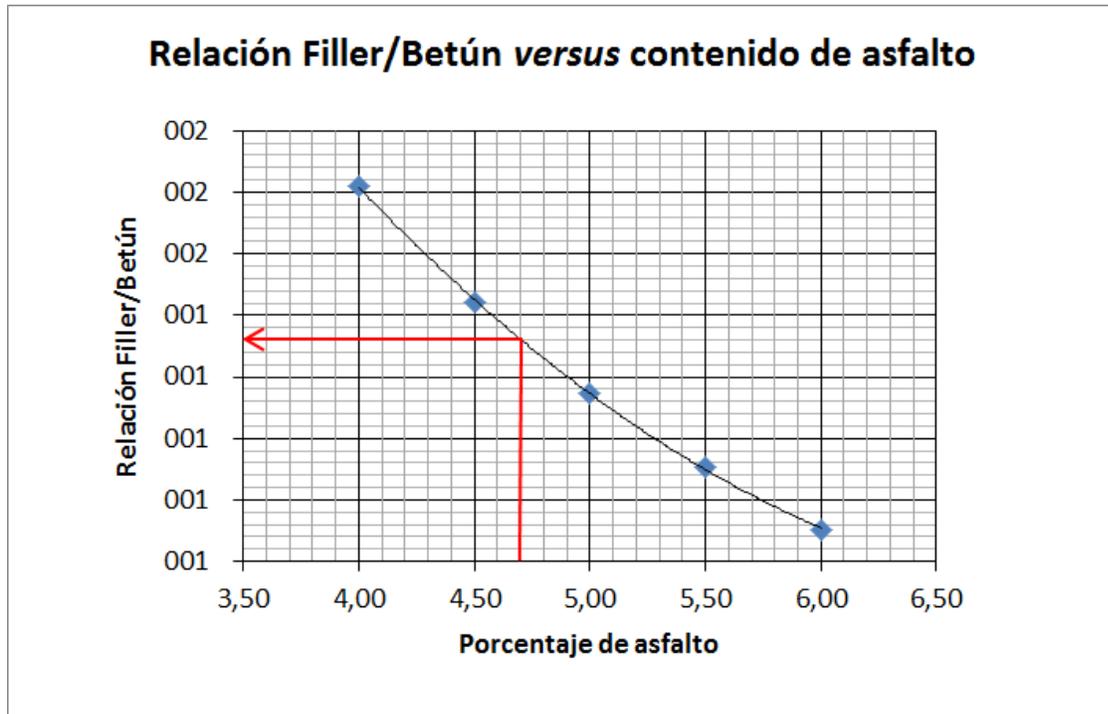
Figura 51. **Gráfico relación estabilidad/fluencia (REF) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

La figura 52 contiene el gráfico de la relación Filler/Betún, donde se puede observar que para un porcentaje de asfalto de 4,70 %, la relación Filler/Betún es de 1,36, que cumple con el rango establecido en la especificación, que es de 0,60 a 1,60.

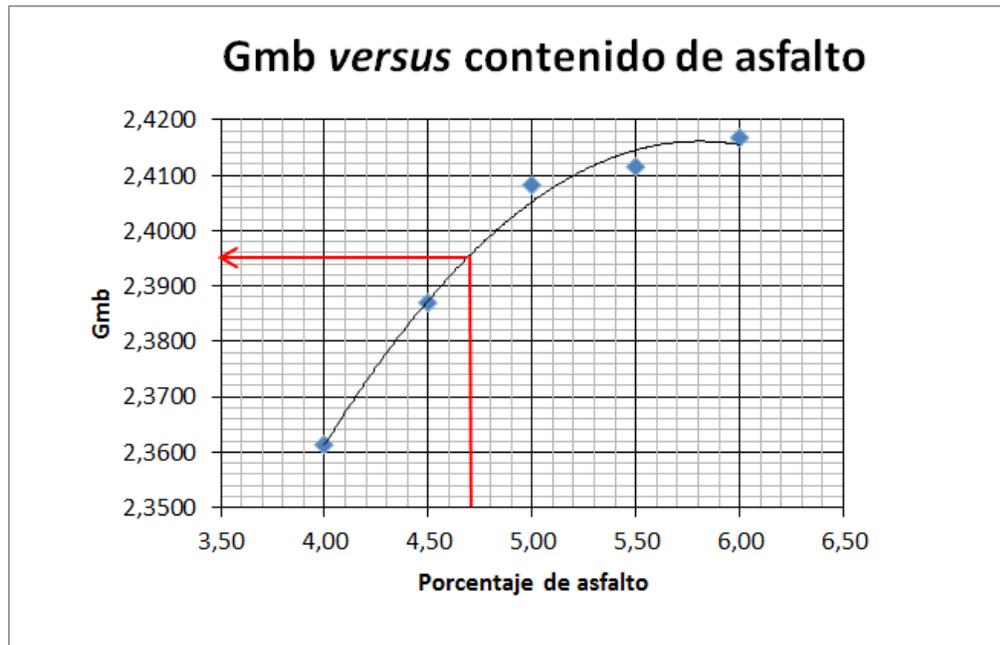
Figura 52. Gráfico relación Filler/Betún (F/B) versus porcentaje de asfalto



Fuente: elaboración propia.

En la figura 53 se muestra el gráfico de la gravedad específica bruta de la mezcla en función del porcentaje de asfalto, donde se puede observar que para un 4,70 % de asfalto, la mezcla tiene una gravedad específica bruta de 2 396.

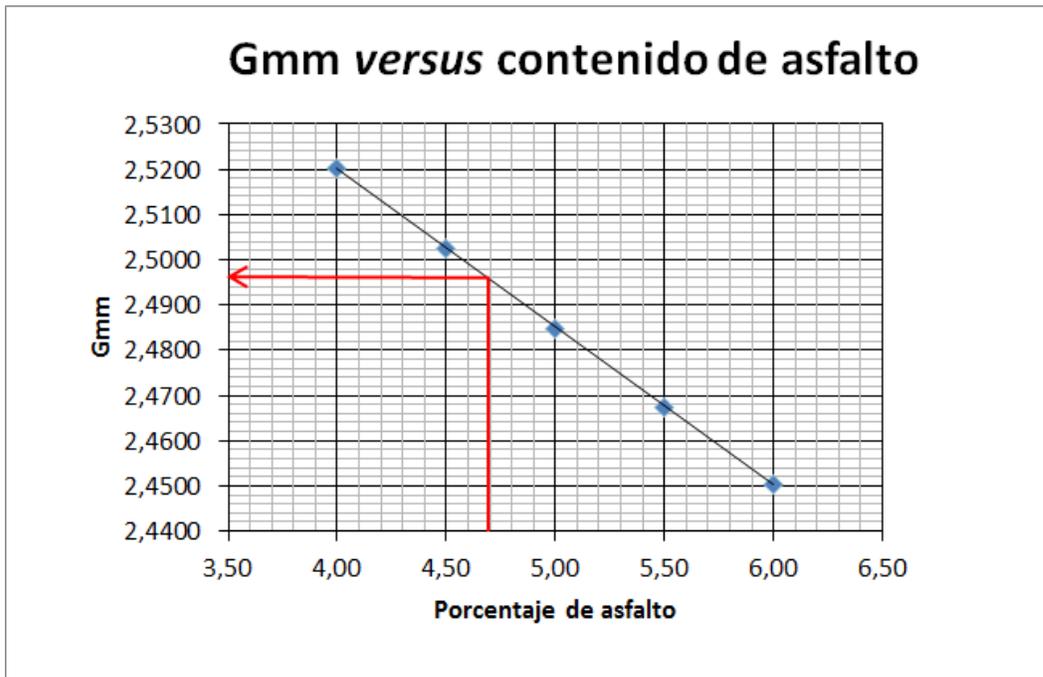
Figura 53. **Gráfico gravedad específica bruta (Gmb) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 54 se muestra el gráfico de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla en función del porcentaje de asfalto, donde se puede observar que para un 4,70 % de asfalto, la mezcla tiene una gravedad específica teórica máxima de 2 496.

Figura 54. **Gráfico gravedad específica teórica máxima (Gmm) versus porcentaje de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

La tabla XXII contiene el resumen de las propiedades de la mezcla para un 4,70 % de asfalto, las cuales cumplen con los parámetros establecidos en especificaciones, por lo tanto, el porcentaje óptimo para la combinación de agregados utilizados es 4,70 %.

Tabla XXII. **Resumen de propiedades de la mezcla para 4,70 % de asfalto**

PROPIEDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		MÍNIMO	MÁXIMO
% Vacíos de aire (Va)	4,00	3,00	5,00
% Vacíos agregado mineral (VMA)	14,10	13,00	***
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	72,00	65,00	75,00
% Asfalto efectivo (Pbe)	4,50	***	***
Estabilidad Marshall (E)	2 250 Lbs.	1 200 Lbs.	***
Fluencia Marshall	10,9	8	14
Relación estabilidad/fluencia (REF)	206	120	275
Relación Filler/Betún (F/B)	1,36	0,6	1,6
Gravedad específica bruta (Gmb)	2 3960	***	***
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2 4960	***	***

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Mezcla con asfalto modificado con aceite de palma

Para evaluar el desempeño de la mezcla tibia con aceite crudo de palma, se realizaron probetas con la misma granulometría y porcentaje de asfalto de la mezcla patrón, utilizando asfalto modificado con 2,0, 2,5 y 3,0 % de aceite crudo de palma, para determinar el porcentaje de aceite de palma que logre reducir considerablemente la temperatura de mezclado sin afectar el desempeño de la mezcla. Los informes de laboratorio con los resultados de los ensayos realizados a la mezcla con aceite de palma se incluyen en el los anexos.

4.4.2.1. Mezcla patrón con 4,70 % de asfalto sin modificar

Se elaboraron probetas de mezcla con 4,70 % de asfalto sin modificar, para tener como base de comparación parámetros reales del desempeño de la mezcla, y no los datos teóricos del diseño de mezcla. Las propiedades de la mezcla patrón se muestran en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. Resumen de propiedades de la mezcla con 4,70 % de asfalto sin modificar

PROPIEDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		MÍNIMO	MÁXIMO
% Vacíos de aire (Va)	3,80	3,00	5,00
% Vacíos agregado mineral (VMA)	13,89	13,00	***
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	72,95	65,00	75,00
% Asfalto efectivo (Pbe)	4,49	***	***
Estabilidad Marshall (E)	2 351 Lbs.	1 200 Lbs.	***
Fluencia Marshall	11,2	8	14
Relación estabilidad/fluencia (REF)	208	120	275
Relación Filler/Betún (F/B)	1,36	0,6	1,6
Gravedad específica bruta (Gmb)	2 4017	***	***
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2 4955	***	***

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.2. Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma fueron mezcladas a una temperatura de 305 °F y compactadas a 290 °F, según los datos de la curva reológica del asfalto con 2,0 % de aceite de palma.

Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla utilizando asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma se muestran en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2,0 % de aceite de palma**

PROPIEDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		MÍNIMO	MÁXIMO
% Vacíos de aire (Va)	4,10	3,00	5,00
% Vacíos agregado mineral (VMA)	14,20	13,00	***
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	71,43	65,00	75,00
% Asfalto efectivo (Pbe)	4,49	***	***
Estabilidad Marshall (E)	2 051 Lbs.	1 200 Lbs.	***
Fluencia Marshall	13,3	8	14
Relación estabilidad/fluencia (REF)	153,8	120	275
Relación Filler/Betún (F/B)	1,36	0,6	1,6
Gravedad específica bruta (Gmb)	2 3931	***	***
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2 4943	***	***
Temperatura de mezclado (°F)	305	***	***
Temperatura de compactación (°F)	290	***	***

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.3. **Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma**

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma fueron mezcladas a una temperatura de 300 °F y compactadas a 285 °F, según los datos de la curva reológica del asfalto con 2,5 % de aceite de palma. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla utilizando asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma se muestran en la tabla XXV.

Tabla XXV. **Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 2,5 % de aceite de palma**

PROPIEDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		MÍNIMO	MÁXIMO
% Vacíos de aire (Va)	3,80	3,00	5,00
% Vacíos agregado mineral (VMA)	13,94	13,00	***
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	73,04	65,00	75,00
% Asfalto efectivo (Pbe)	4,49	***	***
Estabilidad Marshall (E)	1 913 Lbs.	1 200 Lbs.	***
Fluencia Marshall	13,3	8	14
Relación estabilidad/fluencia (REF)	143,5	120	275
Relación Filler/Betún (F/B)	1,36	0,6	1,6
Gravedad específica bruta (Gmb)	2 4005	***	***
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2 4942	***	***
Temperatura de mezclado (°F)	300	***	***
Temperatura de compactación (°F)	285	***	***

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.4. **Mezcla con 4,70 % de asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma**

Las probetas de mezcla con asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma fueron mezcladas a una temperatura de 290 °F y compactadas a 275 °F, según los datos de la curva reológica del asfalto con 3,0 % de aceite de palma. Los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla utilizando asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma se muestran en la tabla XXVI.

Tabla XXVI. **Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto modificado con 3,0 % de aceite de palma**

PROPIEDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		MÍNIMO	MÁXIMO
% Vacíos de aire (Va)	4,20	3,00	5,00
% Vacíos agregado mineral (VMA)	14,32	13,00	***
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	70,80	65,00	75,00
% Asfalto efectivo (Pbe)	4,49	***	***
Estabilidad Marshall (E)	1,767 Lbs.	1,200 Lbs.	***
Fluencia Marshall	11,8	8	14
Relación estabilidad/fluencia (REF)	149,3	120	275
Relación Filler/Betún (F/B)	1,36	0,6	1,6
Gravedad específica bruta (Gmb)	2,3897	***	***
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2 4940	***	***
Temperatura de mezclado (°F)	290	***	***
Temperatura de compactación (°F)	275	***	***

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla con 2,0, 2,5 y 3,0 % de aceite de palma, se puede observar que todas las propiedades cumplen con los límites establecidos en las especificaciones de la Dirección General de Caminos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Comparación de resultados de pruebas de desempeño en laboratorio

La tabla XXVII muestra un resumen con los resultados de las pruebas de desempeño realizadas a la mezcla asfáltica con asfalto sin modificar y con asfalto modificado con 2,0, 2,5 y 3,0 % de aceite de palma.

Tabla XXVII. **Resumen de propiedades de la mezcla con asfalto sin modificar y con asfalto modificado con aceite de palma**

PROPIEDAD	TEÓRICO	AC-20 SIN MODIFICAR	AC-20 + 2.0% DE ACEITE DE PALMA	AC-20 + 2.5% DE ACEITE DE PALMA	AC-20 + 3.0% DE ACEITE DE PALMA
% Vacíos de Aire (Va)	4,00	3,80	4,10	3,80	4,20
% Vacíos Agregado Mineral (VMA)	14,10	13,89	14,20	13,94	14,32
% Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	72,00	72,95	71,43	73,04	70,80
% Asfalto Efectivo (Pbe)	4,50	4,49	4,49	4,49	4,49
Estabilidad Marshall (E)	2 250 Lbs.	2 351 Lbs.	2 051 Lbs.	1 913 Lbs.	1 767 Lbs.
Fluencia Marshall	10,9	11,2	13,3	13,3	11,8
Relación Estabilidad/Fluencia (REF)	206	208	153,8	143,5	149,3
Relación Polvo/Asfalto (F/B)	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Gravedad Específica Bruta (Gmb)	2,3960	2,4017	2,3931	2,4005	2,3897
Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)	2,4960	2,4955	2,4943	2,4942	2,4940
Temperatura de Mezclado °F	320	320	305	300	290
Temperatura de Compactación °F	300	300	290	285	275

Fuente: elaboración propia.

5.2. Análisis e interpretación de resultados

De la tabla XXVII puede observarse, que al aumentar el porcentaje de aceite de palma en el asfalto, si bien algunas propiedades de la mezcla se ven afectadas, todas cumplen con las especificaciones. Como es de esperar, la propiedad que más se ve afectada es la estabilidad Marshall, disminuyendo un 25 % para el asfalto con 3,0 % de aceite de palma, se puede inferir que, al aumentar el contenido de aceite de palma, el asfalto se vuelve más blando. A pesar de la disminución en la estabilidad Marshall, la mezcla cumple con el mínimo establecido en las especificaciones.

CONCLUSIONES

1. El aceite crudo de palma cumple la función de disminuir la viscosidad del asfalto, a pesar de que aumenta el valor de la penetración y disminuye la temperatura de ablandamiento del asfalto, por lo que puede utilizarse como aditivo reductor de viscosidad.
2. A partir de los resultados obtenidos, al adicionar 3 % de aceite de palma al asfalto, se logra reducir significativamente las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla sin afectar su desempeño.
3. Al utilizar la granulometría y el porcentaje óptimo de asfalto obtenido a partir del diseño de mezcla patrón en la mezcla asfáltica tibia, fue posible comparar los resultados de ambos tipos de mezcla en igualdad de condiciones de laboratorio.
4. Al comparar las propiedades de la mezcla tibia producida a 290 °F con los resultados de la mezcla convencional, se pudo observar que utilizar aceite crudo de palma africana no afecta las propiedades volumétricas de la mezcla tibia, sin embargo, disminuye ligeramente la carga de estabilidad y la fluencia Marshall sin salir de los límites establecidos en las especificaciones de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el aceite crudo de palma africana como aditivo para producir mezclas asfálticas tibias en Guatemala.
2. Utilizar el aceite crudo de palma africana en proporciones no mayores al 3 % en relación al peso del asfalto para no perjudicar el desempeño de la mezcla.
3. En climas cálidos, donde las temperaturas del pavimento son altas, no es recomendable utilizar ligantes demasiado blandos, ya que la mezcla podría ser más susceptible a fallas por ahuellamiento.
4. Utilizar los resultados obtenidos de la presente investigación para elaborar un trabajo de investigación que permita crear una propuesta de norma, que avale la colocación y compactación de mezcla asfáltica a menores temperaturas que las convencionales y así sea permitida la utilización de mezclas asfálticas tibias por la Dirección General de Caminos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dirección General de Caminos Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: DGC MCIV, 2000. 361 p.
2. LOPERA PALACIOS, Conrado Hernando. *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de asfalto y aceite crudo de palma*. Director: Jorge Eliécer Córdoba Maquilón Ph.D. Tesis de Maestría en Ingeniería, Infraestructura y Sistemas de Transporte. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, 2011. 102 p.
3. LUCAS ESPINOZA, Dennys Stalin. *Proceso de extracción y potencial de aceite de palma africana (elaeis guineensis jacq.) En la extractora La Joya en la provincia de Santo Domingo de los T-sachilas*. Tutor: Ing. Wilson Nieto. 2012. 105 p.
4. *The Asphalt Handbook MS-4*. The Asphalt Institute. 7th Edition. 2007.
5. *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*. 3a edición. 2012. 68 p.

ANEXOS



No. 0803

O.T. No. 33007
No. Informe LIEXVE-QI 18-2014

Interesado: Amadeo José García Ávila
Estudiante de Ingeniería Civil
Camé: 2008-19397

Proyecto: Trabajo de graduación a nivel tesis "Diseño de mezclas asfálticas tibias utilizando aceite crudo de palma como reductor de viscosidad"

Fecha: Guatemala, 09 de junio de 2014

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos realizados al aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Tabla No.1

Resultados de índice de peróxido* de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Corrida	Masa de aceite (g)	Volumen gastado de Tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	Índice de peróxido	Promedio índice de peróxido
1	10.00	3.60	3.60	3.34 ± 0.19
2	10.02	3.30	3.29	
3	10.00	3.15	3.15	

*Análiticos en alimentaria "Métodos Oficiales de Análisis Aceites y Grasas",
Reglamento Cooperativa Europea CEE
Fuente: Datos experimentales -LIEXVE-

Tabla No. 2

Resultados de índice de yodo* de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Corrida	Masa de aceite (g)	Volumen gastado de Tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	Índice de yodo	Promedio índice de yodo
1	0.79	15.00	45.21	44.55 ± 0.70
2	0.79	15.70	43.82	
3	0.77	15.30	44.61	

*Análiticos en alimentaria "Métodos Oficiales de Análisis Aceites y Grasas",
Reglamento Cooperativa Europea CEE.
Fuente: Datos experimentales -LIEXVE-

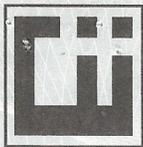


Tabla No. 3

Resultados índice de acidez* de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Corrida	Índice de acidez (%)	Promedio índice de acidez (%)
1	10.10	9.97 ± 0.11
2	9.90	
3	9.90	

*Analíticos en alimentaria "Métodos Oficiales de Análisis Aceites y Grasas",
Reglamento Cooperativa Europea CEE.
Fuente: Datos experimentales -LIXVE-.

Tabla No. 4

Resultados impurezas insolubles* del aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Corrida	Masa aceite (g)	Porcentaje impurezas insolubles (%)	Promedio impurezas insolubles (%)
1	9.98	0.301	0.299 ± 0.002
2	10.09	0.297	
3	10.02	0.299	

*Norma Mexicana NMX-F-215. Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales.
Fuente: Datos experimentales -LIXVE-.

Tabla No. 5

Resultados humedad y materia volátil* del aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Corrida	Humedad (%)	Promedio Humedad y materia volátil (%)
1	0.798	0.793 ± 0.008
2	0.784	
3	0.796	

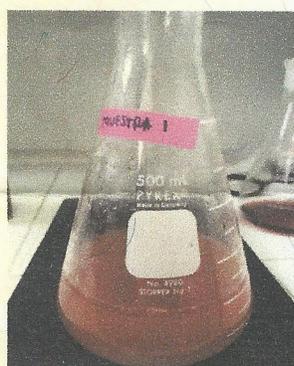
*Análisis utilizando balanza de humedad para determinación de contenido de humedad en aceites y grasas.
Fuente: Datos experimentales -LIXVE-.



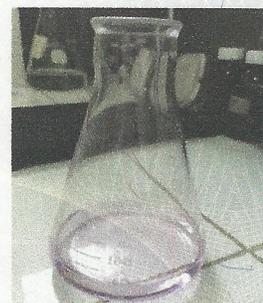
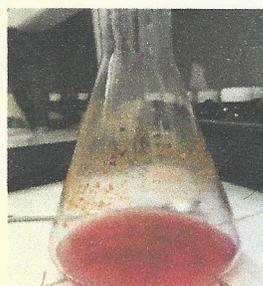
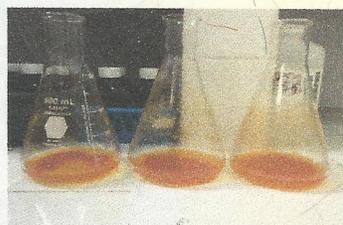
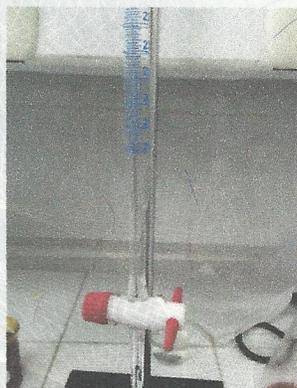
No. **0805**

ANEXOS

Determinación de Índice de yodo de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).



Determinación de Índice de acidez de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).



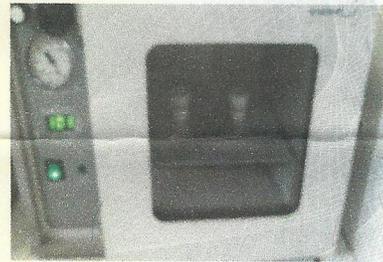
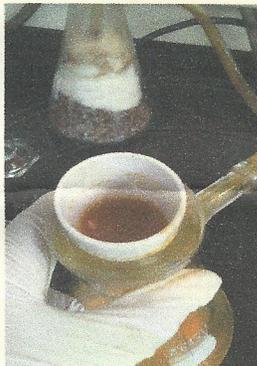
Determinación de Índice de peróxidos de aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis*).

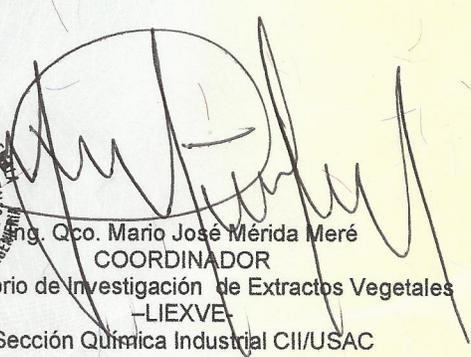




No. 0806

Determinación del porcentaje de impurezas insolubles de aceite crudo
de palma africana (*Elaeis guineensis*).




Ing. Qco. Mario José Mérida Meré
COORDINADOR
Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales
-LIEXVE-
Sección Química Industrial CII/USAC




Vo.Bo. Inga. Qca. Telma Marcela Cano Morales
DIRECTORA
Centro de Investigaciones de Ingeniería/USAC

DESINTEGRACIÓN POR ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (ASTM C 131)

Fecha: 13/11/2013 Material: 1" A No. 56 Procedencia: AGRECA P.P.O.

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

GRADUACIÓN B No DE ESFERAS 11 PESO DE LA CARGA (g) 4 586,00

PASA	RETENIDO	TARA (g)	PESO BRUTO (g)	PESO NETO (g)
1 1/2"	1"			-
1"	3/4"			-
3/4"	1/2"	318,00	2 822,00	2 504,00
1/2"	3/8"	318,00	2 820,00	2 502,00
3/8"	1/4"			
1/4"	No. 4			-
No. 4	No. 8			-
			PESO TOTAL	5 006,00

PESO DE MATERIAL SECO TAMIZADO (MALLA No. 12)

PESO BRUTO 4 400,00
TARA (g) 318,00
PESO NETO (g) 4 082,00

$$\% \text{ PERDIDA} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$$

% PÉRDIDA 18,46

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo.: Inga. Dina Avellán

DESINTEGRACIÓN POR ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (ASTM C 131)

Fecha: 13/11/2013 Material: 3/8" A No.8 Procedencia: AGRECA P.P.O.

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

GRADUACIÓN C No DE ESFERAS 8 PESO DE LA CARGA (g) 3 310,00

PASA	RETENIDO	TARA (g)	PESO BRUTO (g)	PESO NETO (g)
1 1/2"	1"			-
1"	3/4"			-
3/4"	1/2"			-
1/2"	3/8"			-
3/8"	1/4"	317,20	2 814,00	2 496,80
1/4"	No. 4	317,20	2 819,20	2 502,00
No. 4	No. 8			-
PESO TOTAL				4 998,80

PESO DE MATERIAL SECO TAMIZADO (MALLA No. 12)

PESO BRUTO 4 485,00
TARA (g) 317,00
PESO NETO (g) 4 168,00

$$\% \text{ PERDIDA} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$$

% PÉRDIDA 16,62

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo.: Inga. Dina Avellán

DESINTEGRACIÓN POR ATAQUE DE SULFATOS, 5 CICLOS AASHTO T 104

Fecha: 15 de Noviembre de 2013
Material: Agregado 1" a No. 56
Procedencia: AGRECA Planta Palín Oeste
Solución Utilizada: Sulfato de sodio
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PASA	RETENIDO	GRADUACIÓN POR FRACCIÓN	ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO	% DE DESGASTE	DESGASTE REFERENTE A GRADUACIÓN (%)
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	67,00	672,80	662,40	1,55	1,04
1/2"	3/8"	33,00	331,30	323,90	2,24	0,74
3/8"	No. 4					
No. 4	No. 8					
No. 8	No. 16					
No. 16	No. 30					
No. 30	No. 50					
TOTALES		100,00	1004,10			1,78

% DESINTEGRACIÓN 1,78%

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo.: Inga. Dina Avellán

DESINTEGRACIÓN POR ATAQUE DE SULFATOS, 5 CICLOS AASHTO T 104

Fecha: 15 de Noviembre de 2013
Material: Agregado 3/8" A No.8
Procedencia: AGRECA Planta Palín Oeste
Solución Utilizada: Sulfato de sodio
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PASA	RETENIDO	GRADUACIÓN POR FRACCIÓN	ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO	% DE DESGASTE	DESGASTE REFERENTE A GRADUACIÓN (%)
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4	75,00	300,42	288,80	3,87	2,90
No. 4	No. 8	25,00	100,16	96,50	3,66	0,92
No. 8	No. 16					
No. 16	No. 30					
No. 30	No. 50					
TOTALES		100,00	400,58			3,82

% DESINTEGRACIÓN 3,82%

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo.: Inga. Dina Avellán

DESINTEGRACIÓN POR ATAQUE DE SULFATOS, 5 CICLOS AASHTO T 104

Fecha: 15 de Noviembre de 2013
Material: Agregado 1/4" A 0
Procedencia: AGRECA Planta Palín Oeste
Solución Utilizada: Sulfato de sodio
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PASA	RETENIDO	GRADUACIÓN POR FRACCIÓN	ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO	% DE DESGASTE	DESGASTE REFERENTE A GRADUACIÓN (%)
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"					
1/2"	3/8"					
3/8"	No. 4					
No. 4	No. 8	25,00	100,20	99,20	1,00	0,25
No. 8	No. 16	25,00	100,50	95,40	5,08	1,27
No. 16	No. 30	25,00	100,20	96,80	3,40	0,85
No. 30	No. 50	25,00	100,24	96,40	3,84	0,96
TOTALES		100,00	401,14			3,33

% DESINTEGRACIÓN 3,33%

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo.: Inga. Dina Avellán

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

Fecha: 03/02/2014 Material: 1" A No. 56
Fracción: Única Procedencia: AGRECA P.P.O.
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

- A) $\frac{430,80}{\quad}$ PESO SECO AL AIRE (g)
B) $\frac{433,70}{\quad}$ PESO SECO SATURADO AL AIRE (g)
C) $\frac{272,00}{\quad}$ PESO SECO SATURADO EN AGUA (g)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA

$$Gsb = \frac{A}{B - C} \quad 2,6642$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUPERFICIE SECO SATURADA

$$Gsb \text{ s. s. s} = \frac{B}{B - C} \quad 2,6821$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE

$$Gsa = \frac{A}{A - C} \quad 2,7128$$

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

$$Abs = \frac{(B - A) * 100}{A} \quad 0,6732$$

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo.Bo.: _____
Inga. Dina Avellán

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

Fecha: 03/02/2014 Material: 3/8" A No.8
Fracción: Única Procedencia: AGRECA P.P.O.
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

- A) 379,70 PESO SECO AL AIRE (g)
B) 382,55 PESO SECO SATURADO AL AIRE (g)
C) 239,61 PESO SECO SATURADO EN AGUA (g)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA

$$Gsb = \frac{A}{B - C} \quad 2,6563$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUPERFICIE SECO SATURADA

$$Gsb \text{ s. s. s} = \frac{B}{B - C} \quad 2,6763$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE

$$Gsa = \frac{A}{A - C} \quad 2,7104$$

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

$$Abs = \frac{(B - A) * 100}{A} \quad 0,7506$$

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo.Bo.: _____
Inga. Dina Avellán

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

Fecha: 03/02/2014 Material: 1/4" A 0
Fracción: Única Procedencia: AGRECA P.P.O.
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

- A) $\frac{230,18}{B - C}$ PESO SECO AL AIRE (g)
B) $\frac{231,40}{B - C}$ PESO SECO SATURADO AL AIRE (g)
C) $\frac{144,70}{B - C}$ PESO SECO SATURADO EN AGUA (g)

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA

$$Gsb = \frac{A}{B - C} \quad 2,6549$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUPERFICIE SECO SATURADA

$$Gsb \text{ s. s. s} = \frac{B}{B - C} \quad 2,6690$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE

$$Gsa = \frac{A}{A - C} \quad 2,6928$$

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

$$Abs = \frac{(B - A) * 100}{A} \quad 0,5300$$

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo.Bo.: _____
Inga. Dina Avellán

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE COMBINACIÓN

Fecha: 03/02/2014 Material: COMBINACIÓN DE AGREGADOS TMN 19.00 mm
 Fracción: Única Procedencia: AGRECA P.P.O.
 Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

	Material	Proporción	Gsb	Gsb s.s.s	Gsa	%Absorción
A)	1" - No. 56	30%	2,6642	2,6821	2,7128	0,6732
B)	3/8" - No.8	30%	2,6563	2,6763	2,7104	0,7506
C)	1/4" - 0"	40%	2,6549	2,669	2,6928	0,53

GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA

$$Gsb = \frac{100}{\left(\frac{\%A}{GsbA} + \frac{\%B}{GsbB} + \frac{\%C}{GsbC}\right)} = 2,6581$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA SUPERFICIE SECO SATURADA

$$Gsb \text{ s. s. s} = \frac{100}{\left(\frac{\%A}{Gsb \text{ s. s. s}A} + \frac{\%B}{Gsb \text{ s. s. s}B} + \frac{\%C}{Gsb \text{ s. s. s}C}\right)} = 2,6751$$

GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE

$$Gsa = \frac{100}{\left(\frac{\%A}{GsaA} + \frac{\%B}{GsaB} + \frac{\%C}{GsaC}\right)} = 2,7040$$

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

$$Abs = \frac{100}{\left(\frac{\%A}{AbsA} + \frac{\%B}{AbsB} + \frac{\%C}{AbsC}\right)} = 0,6250$$

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo.Bo.: _____
Inga. Dina Avellán

EQUIVALENTE DE ARENA

Fecha 2 de abril de 2014

Proyecto TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

1		2	
10:25	10:38	10:30	10:43
Min. 00:10	Min. 00:20	Min. 00:10	Min. 00:20
10:35	10:58	10:40	11:03

1. Lectura de Arena: 3 0,811 %
Lectura de Arcilla: 3,7

2. Lectura de Arena: 2,9 0,806 %
Lectura de Arcilla: 3,6

0,81 %

Observaciones: Agregado 1/4" a 0 AGRECA Planta Palín Oeste

Efectuó: Amadeo García

Vo. Bo. Ing. Dina Avellan

PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS

Fecha: 2 de abril de 2014
Agregado: Combinación TMN 19.00 mm
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Agregado Total		
Peso Bruto Muestra (g)	Tara (g)	Peso Neto Muestra (g)
284,5	84,5	200

Partículas Planas y Alargadas		
Peso Bruto Muestra (g)	Tara (g)	Peso Neto Muestra (g)
90,1	84,5	5,6

Porcentaje Partículas Planas y Alargadas (%)
2,80

Observaciones
45% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
25% Agregado 3/8" a No 8 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo. Bo. _____
Ing. Dina Avellan

PESOS UNITARIOS

FECHA: 10 de abril de 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PESOS UNITARIOS SUELTOS

AGREGADO 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO

1 785		
1 770		
1 780	1 778	Kgs/M3

AGREGADO 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

1 380		
1 375		
1 385	1 380	Kgs/M3

AGREGADO 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO

1 453		
1 446		
1 450	1 450	Kgs/M3

AGREGADOS COMBINADOS

40% 1/4" a 0" AGREGUA PPO
30% 3/8" a No.8 AGREGUA PPO
30% 1" a No.56 AGREGUA PPO

1 700		
1 695		
1 710	1 702	Kgs/M3

PESOS UNITARIOS VARILLADOS

AGREGADO 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO

1 983		
1 990		
1 995	1 989	Kgs/M3

AGREGADO 3/8" Lavado Cantera AGREGUA PPO

1 550		
1 560		
1 543	1 551	Kgs/M3

AGREGADO 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO

1 640		
1 635		
1 630	1 635	Kgs/M3

AGREGADOS COMBINADOS

40% 1/4" a 0" AGREGUA PPO
30% 3/8" a No.8 AGREGUA PPO
30% 1" a No.56 AGREGUA PPO

1 950		
1 965		
1 975	1 963	Kgs/M3

Efectuó: Amadeo García

Vo. Bo. Ing. Dina Avellan

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA (Gmm)

FECHA: 10 de abril de 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

TIPO DE MUESTRA: 19 mm con 5.0% de asfalto AC-20 sin modificar

PROCEDENCIA: Planta central Asfalgua

Temperatura del agua (°C)	26,00	Factor de corrección por temperatura	0,999738
---------------------------	-------	---	----------

1 Contenido de asfalto en peso total de la muestra	5,00		%
2 Peso de vidrio de enrase	827,00		gr.
3 Peso de picnómetro	2137,00		gr.
4 Peso de picnómetro + vidrio + agua	8287,67		gr.
5 Peso de picnómetro + agua	7460,67		gr.
6 peso de picnómetro + muestra	4695,00		gr.
7 Peso de la muestra	2558,00		gr.
8 Peso de picnómetro + agua + muestra + vidrio después de aplicado el vacío	9816,00		gr.
9 Peso de picnómetro + agua + muestra después de aplicado el vacío	8989,00		gr.
10 Suma de pesos	10018,67		gr.
11 Peso del volumen de agua igual a la muestra	2765,67		gr.

$$Gmm = \frac{\text{Peso de la muestra}}{[(\text{Peso de la muestra}) + (\text{peso de picnómetro} + \text{agua}) - (\text{peso de picnómetro} + \text{agua} + \text{muestra})] * Fc}$$

Gmm= 2,4849

Efectuó: _____
Amadeo García

Vo. Bo. _____
Ing. Dina Avellan

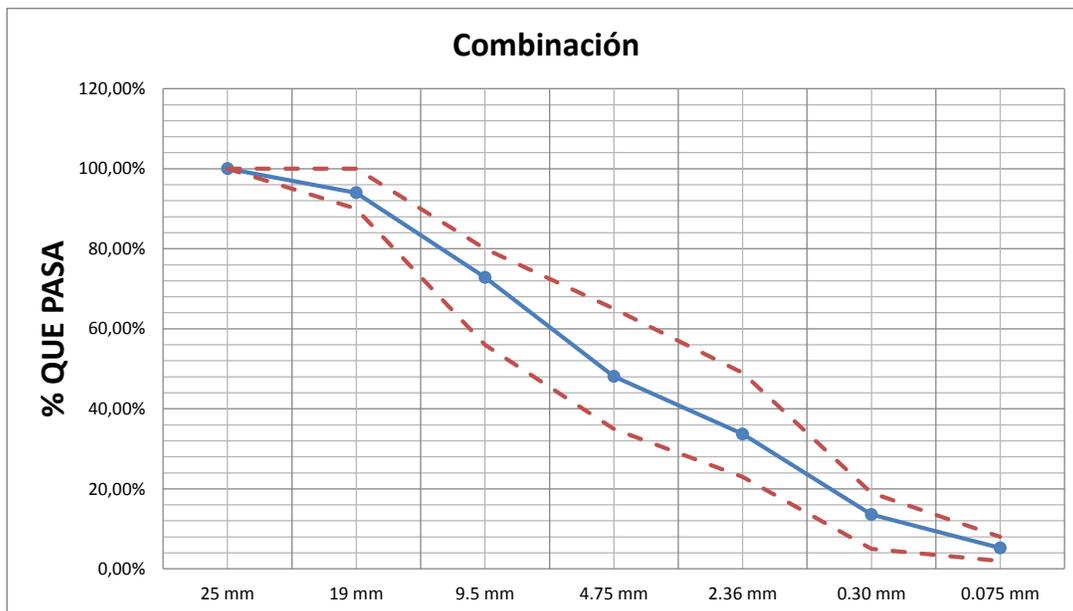
COMBINACIÓN DE AGREGADOS PARA MEZCLA TMN 19 mm

AGREGADO : Combinación teórica
Fecha: 24 de julio de 2014
Tipo: TMN.19mm
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PROPORCIONES	
1" A No.56	30%
3/8" a No.8	30%
1/4" A 0	40%

ABERTURA DE TAMIZ	25 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.30 mm	0.075 mm
1"	100	90-100	56-80	35-65	23-49	5-19	2-8
Especificación	100	90-100	56-80	35-65	23-49	5-19	2-8
1" A No.56 (A)	100	85,96	12,71	3,04	1,99	1,48	1,12
3/8" A No.8 (B)	100	100	90,69	21,68	0,31	0,21	0,18
1/4" A 0 (C)	100	100	100	99,84	81,17	33,44	14,27
0.30*A	30	25,79	3,81	0,91	0,60	0,44	0,34
0.25*B	30	30,00	27,21	6,50	0,09	0,06	0,05
0.45*C	40	40,00	40,00	39,94	32,47	13,37	5,71
Combinación	100	95,79	71,02	47,35	33,16	13,88	6,10

TAMIZ	ABERTURA DE TAMIZ	PESO BRUTO RETENIDO (g)	PESO NETO RETENIDO (g)	% QUE PASA	ESPECIFICACIÓN		
					MINIMO	MAXIMO	MEDIO
1"	25 mm			100,00%	100%	100%	100%
3/4"	19 mm			95,79%	90%	100%	95%
3/8"	9.5 mm			71,02%	56%	80%	68%
No. 4	4.75 mm			47,35%	35%	65%	50%
No.8	2.36 mm			33,16%	23%	49%	36%
No. 50	0.30 mm			13,88%	5%	19%	12%
No. 200	0.075 mm			6,10%	2%	8%	5%



Efectuó: Amadeo García

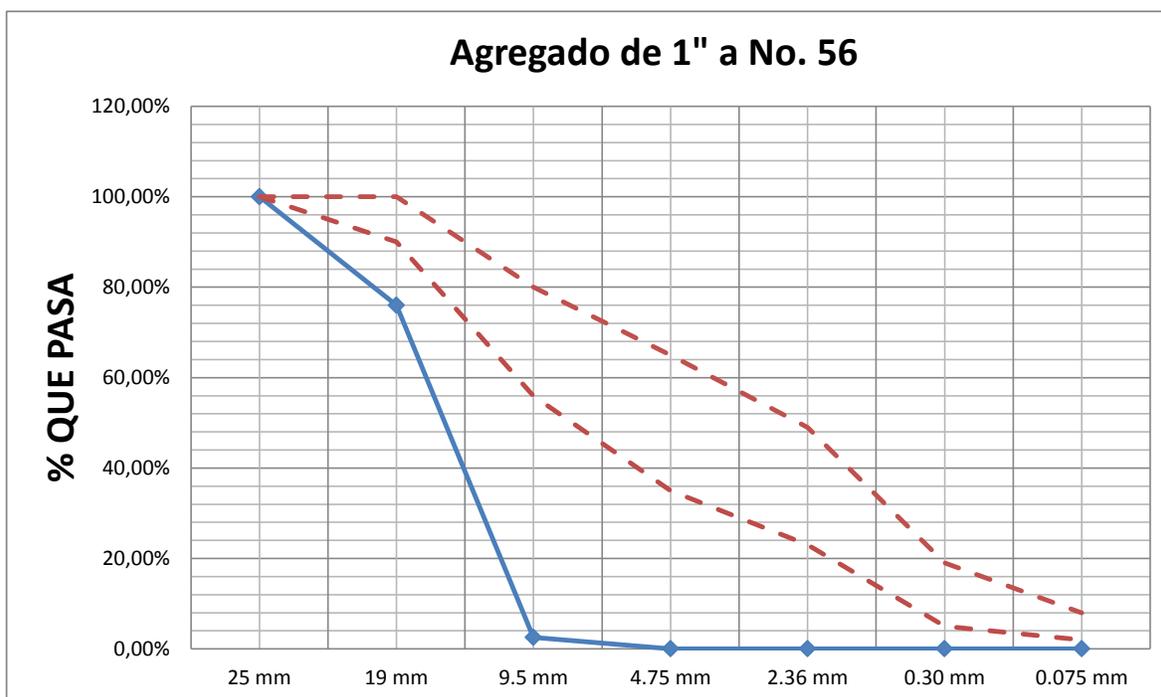
Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Fecha: 02 de Abril 2014
Agregado: 1" A No. 56 AGRECA P.P.O.
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PESO BRUTO: 2239,35 (g)
PESO TARA: 475,9 (g)
PESO NETO: 1763,45 (g)

TAMIZ	ABERTURA DE TAMIZ	PESO BRUTO RETENIDO (g)	PESO NETO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	
						MINIMO	MAXIMO
1"	25 mm	475,90	0	0,00%	100,00%	100%	100%
3/4"	19 mm	723,45	247,55	14,04%	85,96%	90%	100%
3/8"	9.5 mm	2015,20	1539,30	87,29%	12,71%	56%	80%
No. 4	4.75 mm	2185,70	1709,80	96,96%	3,04%	35%	65%
No.8	2.36 mm	2204,20	1728,30	98,01%	1,99%	23%	49%
No. 50	0.30 mm	2213,20	1737,30	98,52%	1,48%	5%	19%
No. 200	0.075 mm	2219,55	1743,65	98,88%	1,12%	2%	8%



Efectuó: Amadeo García

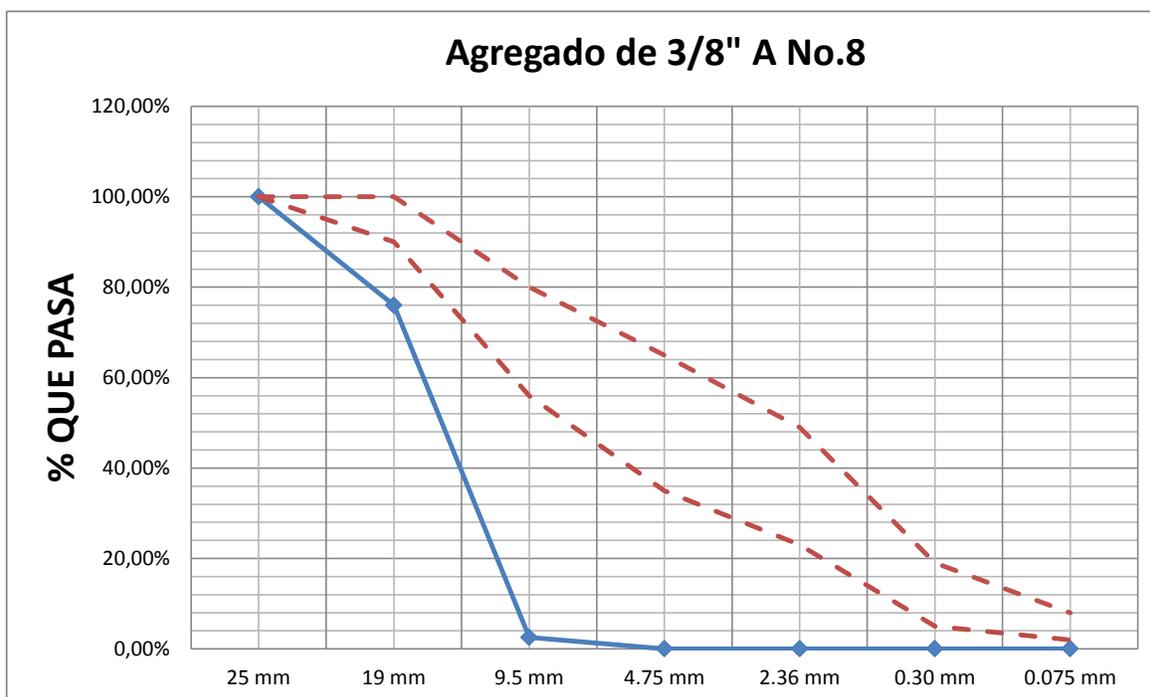
Vo. Bo. Ing. Dina Avellan

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Fecha: 02 de Abril 2014
Agregado: 3/8" A No.8 AGRECA P.P.O.
Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

PESO BRUTO: 1671,95 (g)
PESO TARA: 442,2 (g)
PESO NETO: 1229,75 (g)

TAMIZ	ABERTUR A DE TAMIZ	PESO BRUTO RETENIDO (g)	PESO NETO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	
						MINIMO	MAXIMO
1"	25 mm	442,20	0,00	0,00%	100,00%	100%	100%
3/4"	19 mm	442,20	0,00	0,00%	100,00%	90%	100%
3/8"	9.5 mm	561,75	114,44	9,31%	90,69%	56%	80%
No. 4	4.75 mm	1410,85	963,16	78,32%	21,68%	35%	65%
No.8	2.36 mm	1667,00	1226,00	99,69%	0,31%	23%	49%
No. 50	0.30 mm	1668,60	1227,21	99,79%	0,21%	5%	19%
No. 200	0.075 mm	1669,05	1227,55	99,82%	0,18%	2%	8%



Efectuó: Amadeo García

Vo. Bo. Ing. Dina Avellan

RESULTADOS DEL DISEÑO DE CONCRETO ASFALTICO

FECHA: Junio del 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm.
Según Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos en la Sección 411 de Libro Azul Edición 2,001
40% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

PRUEBAS EFECTUADAS	SÍMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	320	300 --- 325
% Optimo de Asfalto	Pb	4,70	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0,22	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4,50	*****
% Vacíos de Aire	Va	4,0	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	72,00	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	14,10	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg2	2 250	> 1,200
Fluencia Marshall	****	10,9	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	206,0	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	F/B	1,36	0.6 --- 1.6
Grav. Específica Bruta de la Mezcla	Gmb	2,3960	*****
Grav. Específica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2,4960	*****
Grav. Específica Bruta del Agregado	Gsb	2,6581	*****
Grav. Específica Efectiva del Agregado	Gse	2,6728	*****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1,064	*****
% Absorción de Agua	Pwa	0,63	*****
% de Vestimento del Agregado	****	100	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	81,0	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1702	> 1,360 Kgs./Metro3
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2,8	< 8.0

Observaciones: Propiedades teóricas de la mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC-20 sin modificar

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

RESULTADOS DEL DISEÑO DE CONCRETO ASFALTICO

FECHA: Junio del 2014
 PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm.
Según Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos en la Sección 411 de Libro Azul Edición 2,001
40% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

PRUEBAS EFECTUADAS	SÍMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	320	300 --- 325
% Optimo de Asfalto	Pb	4,70	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0,22	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4,49	*****
% Vacíos de Aire	Va	3,8	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	72,95	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	13,89	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg2	2 351	> 1,200
Fluencia Marshall	****	11,2	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	208,0	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	F/B	1,36	0.6 --- 1.6
Grav. Específica Bruta de la Mezcla	Gmb	2,4017	*****
Grav. Específica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2,4955	*****
Grav. Específica Bruta del Agregado	Gsb	2,6581	*****
Grav. Específica Efectiva del Agregado	Gse	2,6728	*****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1,064	*****
% Absorción de Agua	Pwa	0,63	*****
% de Vestimento del Agregado	****	100	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	81,0	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1702	> 1,360 Kgs./Metro3
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2,8	< 8.0

Observaciones: Propiedades de probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC-20 sin modificar

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

RESULTADOS DEL DISEÑO DE CONCRETO ASFALTICO

FECHA: Junio del 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm.
Según Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos en la Sección 411 de Libro Azul Edición 2,001
40% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

PRUEBAS EFECTUADAS	SIMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	290	****
% Optimo de Asfalto	Pb	4,70	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0,22	****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4,49	****
% Vacíos de Aire	Va	4,2	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	70,80	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	14,32	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg2	1 767	> 1,200
Fluencia Marshall	****	11,8	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	149,3	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	F/B	1,36	0.6 --- 1.6
Grav. Especifica Bruta de la Mezcla	Gmb	2,3897	****
Grav. Especifica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2,4940	****
Grav. Especifica Bruta del Agregado	Gsb	2,6581	****
Grav. Especifica Efectiva del Agregado	Gse	2,6728	****
Gravedad Especifica del Asfalto	Gb	1,0583	****
% Absorción de Agua	Pwa	0,63	****
% de Vestimento del Agregado	****	100	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	81,0	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1702	> 1,360 Kgs./Metro3
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2,8	< 8.0

Observaciones: Propiedades de probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC con 3.0% de Aceite Crudo de Palma Africana

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

RESULTADOS DEL DISEÑO DE CONCRETO ASFALTICO

FECHA: Junio del 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm.
Según Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos en la Sección 411 de Libro Azul Edición 2,001
40% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

PRUEBAS EFECTUADAS	SIMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	300	300 --- 325
% Optimo de Asfalto	Pb	4,70	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0,22	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4,49	*****
% Vacíos de Aire	Va	3,8	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	73,04	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	13,94	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg2	1 913	> 1,200
Fluencia Marshall	****	13,3	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	143,5	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	F/B	1,36	0.6 --- 1.6
Grav. Especifica Bruta de la Mezcla	Gmb	2,4005	*****
Grav. Especifica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2,4942	*****
Grav. Especifica Bruta del Agregado	Gsb	2,6581	*****
Grav. Especifica Efectiva del Agregado	Gse	2,6728	*****
Gravedad Especifica del Asfalto	Gb	1,0591	*****
% Absorción de Agua	Pwa	0,63	*****
% de Vestimento del Agregado	****	100	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	81,0	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1702	> 1,360 Kgs./Metro3
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2,8	< 8.0

Observaciones: Propiedades de probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC con 2.5% de Aceite Crudo de Palma Africana

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

RESULTADOS DEL DISEÑO DE CONCRETO ASFALTICO

FECHA: Junio del 2014

PROYECTO: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm.
Según Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos en la Sección 411 de Libro Azul Edición 2,001
40% Agregado 1/4" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 3/8" a No.8 Cantera AGREGUA PPO

PRUEBAS EFECTUADAS	SIMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	305	300 --- 325
% Optimo de Asfalto	Pb	4,70	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0,22	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4,49	*****
% Vacíos de Aire	Va	4,1	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	71,43	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	14,20	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg ²	2 051	> 1,200
Fluencia Marshall	****	13,3	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	153,8	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	F/B	1,36	0.6 --- 1.6
Grav. Especifica Bruta de la Mezcla	Gmb	2,3931	*****
Grav. Especifica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2,4943	*****
Grav. Especifica Bruta del Agregado	Gsb	2,6581	*****
Grav. Especifica Efectiva del Agregado	Gse	2,6728	*****
Gravedad Especifica del Asfalto	Gb	1,0595	*****
% Absorción de Agua	Pwa	0,63	*****
% de Vestimento del Agregado	****	100	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	81,0	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1702	> 1,360 Kgs./Metro ³
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2,8	< 8.0

Observaciones: Propiedades de probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC con 2.0% de Aceite Crudo de Palma Africana

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,0%	2 318,8	516,58	1,0000	2 318,8	2 264,72	9,5	11,0	205,3
2	4,0%	2 116,0	518,08	1,0000	2 116,0		12,8		
3	4,0%	2 359,4	517,48	1,0000	2 359,4		10,8		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,0%	1 220,0	712,2	1 228,6	516,45	1,000253	516,58	2,361683	2,3611
2	4,0%	1 222,6	712,2	1 230,1	517,95	1,000253	518,08	2,359862	
3	4,0%	1 222,2	712,2	1 229,5	517,35	1,000253	517,48	2,361826	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,3611	Pb -	Peso Asfalto	0,09444496
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,26667912
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,064			
Pb -	Contenido de Asfalto	4,0%			
Vb total	0,0887641	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	14,73	
Vsb	0,8527441	Va -	Vacios de aire	6,32	
Vse	0,8480541	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	3,78	
Vba	0,0046900	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,0840741	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	57,09	
Va	0,0631818	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,5204	
VMA	0,1472559	F/B-	Relación polvo asfalto	1,61	
Pbe	0,0894548				
Pba	0,0672254				

Observaciones: Probetas de mezcla con 4.0% de asfalto AC-20 sin modificar, mezcladas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,5%	2 091,7	514,63	1,0000	2 280,0	2 253,63	10	10,3	218,1
2	4,5%	2 180,9	513,53	1,0000	2 180,9		10,2		
3	4,5%	1 961,9	512,43	1,0000	2 300,0		10,8		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,5%	1 226,5	716,7	1 231,2	514,50	1,000253	514,63	2,383265	2,3868
2	4,5%	1 225,9	714,4	1 227,8	513,40	1,000253	513,53	2,387203	
3	4,5%	1 224,6	714,4	1 226,7	512,30	1,000253	512,43	2,389792	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb - Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,3868	Pb - Peso Asfalto	0,10740389
Gsb - Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps - Peso Agregado	2,27934922
Gse - Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728		
Gb - Gravedad Específica del Asfalto	1,064		
Pb - Contenido de Asfalto	4,5%		
Vb total	0,1009435	V.M.A. - Vacios agregado mineral	14,25
Vsb	0,8575107	Va - Vacios de aire	4,63
Vse	0,8527945	Pbe - Contenido asfalto efectivo	4,28
Vba	0,0047162	Pba - Contenido asfalto absorbido	0,22
Vbe	0,0962273	Vfa - Vacios llenos de asfalto	67,53
Va	0,0462620	Gmm - Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,5025
VMA	0,1424893	F/B - Relación polvo asfalto	1,43
Pbe	0,1023859		
Pba	0,0492227		

Observaciones: Probetas de mezcla con 4.5% de asfalto AC-20 sin modificar mezclas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	5,0%	2 278,2	512,37	1,0000	2 278,2	2 243,09	11	11,1	202,7
2	5,0%	2 294,5	510,37	1,0000	2 294,5		10,2		
3	5,0%	2 156,6	509,77	1,0000	2 156,6		12		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	5,0%	1 231,2	721,2	1 233,2	512,00	1,000728	512,37	2,402938	2,4081
2	5,0%	1 229,8	721,2	1 231,2	510,00	1,000728	510,37	2,409618	
3	5,0%	1 229,4	721,2	1 230,6	509,40	1,000728	509,77	2,411672	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb - Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,4081	Pb - Peso Asfalto	0,12040381
Gsb - Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps - Peso Agregado	2,28767232
Gse - Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728		
Gb - Gravedad Específica del Asfalto	1,064		
Pb - Contenido de Asfalto	5,0%		
Vb total	0,1131615	V.M.A. - Vacíos agregado mineral	13,94
Vsb	0,8606419	Va - Vacíos de aire	3,09
Vse	0,8559085	Pbe - Contenido asfalto efectivo	4,78
Vba	0,0047334	Pba - Contenido asfalto absorbido	0,22
Vbe	0,1084281	Vfa - Vacíos llenos de asfalto	77,81
Va	0,0309300	Gmm - Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4849
VMA	0,1393581	F/B- Relación polvo asfalto	1,28
Pbe	0,1153675		
Pba	0,0329095		

Observaciones: Probetas de mezcla con 5.0% de asfalto AC-20 sin modificar mezclas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	5,5%	2 180,0	511,86	1,0000	2 180,0	2 207,64	14	13,6	161,9
2	5,5%	2 237,7	513,46	1,0000	2 237,7		14,5		
3	5,5%	2 205,2	512,22	1,0000	2 205,2		12,4		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	5,5%	1 233,3	723,5	1 235,1	511,61	1,000495	511,86	2,409433	2,4114
2	5,5%	1 235,5	723,5	1 236,7	513,21	1,000495	513,46	2,406206	
3	5,5%	1 238,9	728,0	1 240,0	511,97	1,000495	512,22	2,418671	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb - Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,4114	Pb - Peso Asfalto	0,13262900
Gsb - Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps - Peso Agregado	2,27880741
Gse - Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728		
Gb - Gravedad Específica del Asfalto	1,064		
Pb - Contenido de Asfalto	5,5%		
Vb total	0,1246513	V.M.A. - Vacios agregado mineral	14,27
Vsb	0,8573069	Va - Vacios de aire	2,28
Vse	0,8525918	Pbe - Contenido asfalto efectivo	5,28
Vba	0,0047151	Pba - Contenido asfalto absorbido	0,22
Vbe	0,1199363	Vfa - Vacios llenos de asfalto	84,05
Va	0,0227569	Gmm - Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4676
VMA	0,1426931	F/B- Relación polvo asfalto	1,16
Pbe	0,1276122		
Pba	0,0242133		

Observaciones: Probetas de mezcla con 5.5% de asfalto AC-20 sin modificar mezclas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	6,0%	2 243,0	512,89	1,0000	2 243,0	2 176,30	13,5	13,8	158,1
2	6,0%	2 105,0	513,72	1,0000	2 105,0		13,8		
3	6,0%	2 180,9	513,65	1,0000	2 180,9		14		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	6,0%	1 238,0	725,8	1 238,4	512,64	1,000495	512,89	2,413755	2,4166
2	6,0%	1 240,9	728,0	1 241,5	513,47	1,000495	513,72	2,415499	
3	6,0%	1 243,3	730,3	1 243,7	513,40	1,000495	513,65	2,420500	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,4166	Pb -	Peso Asfalto	0,14499508
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,27158964
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,064			
Pb -	Contenido de Asfalto	6,0%			
Vb total	0,1362736	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	14,54	
Vsb	0,8545915	Va -	Vacios de aire	1,38	
Vse	0,8498914	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	5,78	
Vba	0,0047001	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,1315734	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	90,49	
Va	0,0138351	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4505	
VMA	0,1454085	F/B-	Relación polvo asfalto	1,06	
Pbe	0,1399942				
Pba	0,0147205				

Observaciones: Probetas de mezcla con 6.0% de asfalto AC-20 sin modificar mezclas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,7%	2 280,0	511,73	1,0000	2 280,0	2 268,01	11,5	11,2	201,9
2	4,7%	2 326,9	512,83	1,0000	2 326,9		11		
3	4,7%	2 197,1	513,73	1,0000	2 197,1		11,2		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,7%	1 230,4	721,2	1 232,8	511,60	1,000253	511,73	2,404396	2,4016
2	4,7%	1 231,6	721,2	1 233,9	512,70	1,000253	512,83	2,401577	
3	4,7%	1 232,3	721,2	1 234,8	513,60	1,000253	513,73	2,398731	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,4016	Pb -	Peso Asfalto	0,11287369
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,28869419
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,064			
Pb -	Contenido de Asfalto	4,7%			
Vb total	0,1060843	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	13,90	
Vsb	0,8610264	Va -	Vacios de aire	3,76	
Vse	0,8562909	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	4,48	
Vba	0,0047355	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,1013488	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	72,93	
Va	0,0376249	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4955	
VMA	0,1389736	F/B-	Relación polvo asfalto	1,36	
Pbe	0,1078351				
Pba	0,0400328				

Observaciones: Probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4,7% de asfalto AC-20 sin modificar mezclas a una temperatura de 320 °F y compactadas a 290 °F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA
 COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,7%	1 775,3	512,97	1,0000	1 775,3	1 767,18	10	11,8	149,3
2	4,7%	1 856,4	513,97	1,0000	1 856,4		11,5		
3	4,7%	1 669,8	512,77	1,0000	1 669,8		14		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,7%	1 219,0	709,9	1 222,5	512,60	1,000728	512,97	2,376343	2,3897
2	4,7%	1 232,5	721,2	1 234,8	513,60	1,000728	513,97	2,397982	
3	4,7%	1 227,9	719,0	1 231,4	512,40	1,000728	512,77	2,394627	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,3897	Pb -	Peso Asfalto	0,11231357
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,27733677
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,0583			
Pb -	Contenido de Asfalto	4,7%			
Vb total	0,1061264	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	14,32	
Vsb	0,8567536	Va -	Vacios de aire	4,18	
Vse	0,8520416	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	4,48	
Vba	0,0047120	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,1014144	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	70,80	
Va	0,0418320	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4940	
VMA	0,1432464	F/B-	Relación polvo asfalto	1,36	
Pbe	0,1073268				
Pba	0,0442708				

Observaciones: Probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC-20 modificado con 3.0% de Aceite Crudo de Palma Africana, mezcladas a 290 °F y compactadas a 275°F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,7%	1 832,1	512,95	1,0000	1 832,1	1 913,20	15	13,3	143,5
2	4,7%	2 034,9	512,65	1,0000	2 034,9		13		
3	4,7%	1 872,6	511,25	1,0000	1 872,6		12		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,7%	1 230,1	719,0	1 231,7	512,70	1,000495	512,95	2,398072	2,4005
2	4,7%	1 227,6	716,7	1 229,1	512,40	1,000495	512,65	2,394599	
3	4,7%	1 231,5	721,2	1 232,2	511,00	1,000495	511,25	2,408788	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,4005	Pb -	Peso Asfalto	0,11282286
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,28766350
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,0591			
Pb -	Contenido de Asfalto	4,7%			
Vb total	0,1065271	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	13,94	
Vsb	0,8606386	Va -	Vacios de aire	3,76	
Vse	0,8559052	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	4,48	
Vba	0,0047334	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,1017937	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	73,04	
Va	0,0375677	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4942	
VMA	0,1393614	F/B-	Relación polvo asfalto	1,36	
Pbe	0,1078097				
Pba	0,0397879				

Observaciones: Probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4,7% de asfalto AC-20 modificado con 2.5% de Aceite Crudo de Palma Africana mezcladas a 300 °F y compactadas a 280°F

Efectuó: Amadeo García

Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

CONTROL DE CALIDAD PARA CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 24 de julio de 2014
 Tipo: TMN.19mm

Proyecto: TESIS "DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS UTILIZANDO ACEITE CRUDO DE PALMA COMO REDUCTOR DE VISCOSIDAD"

Estabilidad y Fluencia Marshall

No.	%	Carga (Lbs.)	Volumen Muestra	Factor de Corrección	Carga Corregida	Promedio de Carga	Fluencia	Promedio Fluencia	Relación Estabilidad Fluencia
1	4,7%	2 124,1	514,95	1,0000	2 124,1	2 051,11	13	13,3	153,8
2	4,7%	2 034,9	515,05	1,0000	2 034,9		15		
3	4,7%	1 994,3	512,35	1,0000	1 994,3		12		

Gravedad Específica bruta de la Mezcla

No.	%	Peso neto Muestra	Peso neto en Agua	Peso neto Muestra Saturada	Volumen sin Corregir	Factor de Corrección	Volumen corregido	Gravedad Específica bruta de la Mezcla	Promedio
1	4,7%	1 229,8	716,7	1 231,4	514,70	1,000495	514,95	2,388171	2,3931
2	4,7%	1 230,0	716,7	1 231,5	514,80	1,000495	515,05	2,388095	
3	4,7%	1 231,2	719,9	1 232,0	512,10	1,000495	512,35	2,403028	

Análisis Volumétrico de Mezcla Asfáltica

Gmb -	Gravedad Específica Bruta Mezcla	2,3931	Pb -	Peso Asfalto	0,11247562
Gsb -	Gravedad Específica Bruta Agregado	2,6581	Ps -	Peso Agregado	2,28062258
Gse -	Gravedad Específica Efectiva Agregado	2,6728			
Gb -	Gravedad Específica del Asfalto	1,0595			
Pb -	Contenido de Asfalto	4,7%			
Vb total	0,1061591	V.M.A. -	Vacios agregado mineral	14,20	
Vsb	0,8579898	Va -	Vacios de aire	4,06	
Vse	0,8532709	Pbe -	Contenido asfalto efectivo	4,48	
Vba	0,0047188	Pba -	Contenido asfalto absorbido	0,22	
Vbe	0,1014403	Vfa -	Vacios llenos de asfalto	71,43	
Va	0,0405699	Gmm -	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla AASHTO T 209	2,4943	
VMA	0,1420102	F/B-	Relación polvo asfalto	1,36	
Pbe	0,1074760				
Pba	0,0429838				

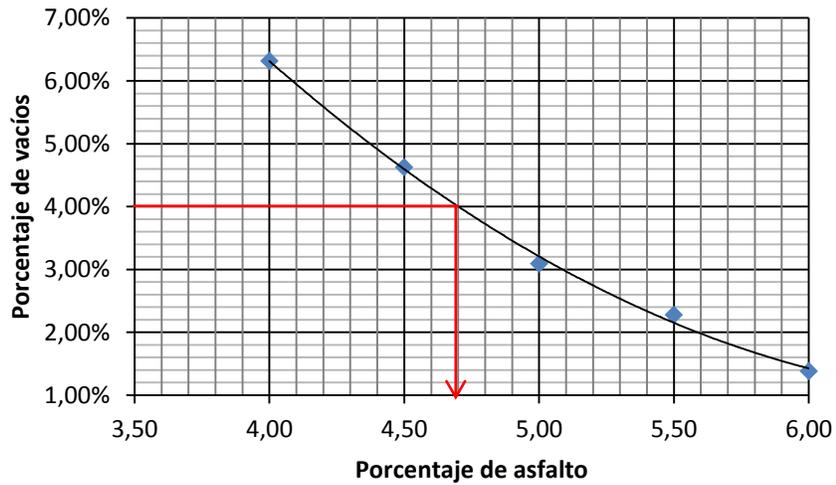
Observaciones: Probetas de mezcla con porcentaje de asfalto óptimo, 4.7% de asfalto AC-20 modificado con 2.0% de Aceite Crudo de Palma Africana mezcladas a 305°F y compactadas a 295°F

Efectuó: Amadeo García

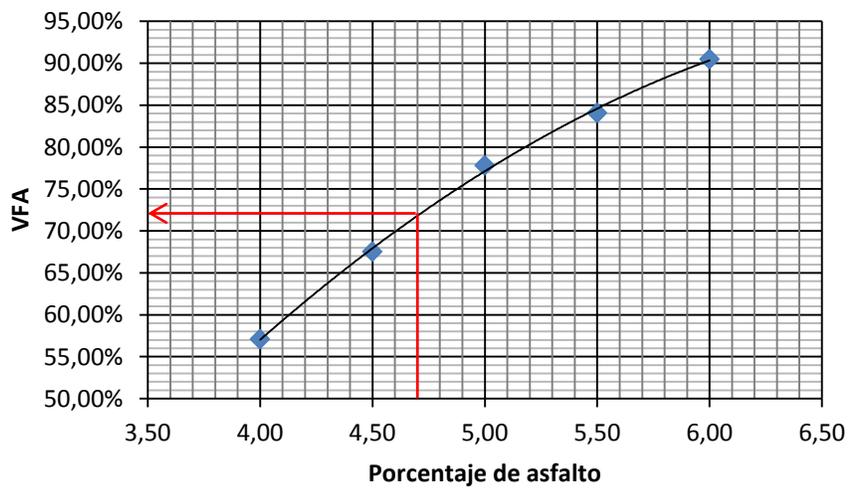
Vo.Bo. Ing. Dina Avellan

GRÁFICAS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA TMN 19 mm

Vacíos de aire *versus* contenido de asfalto

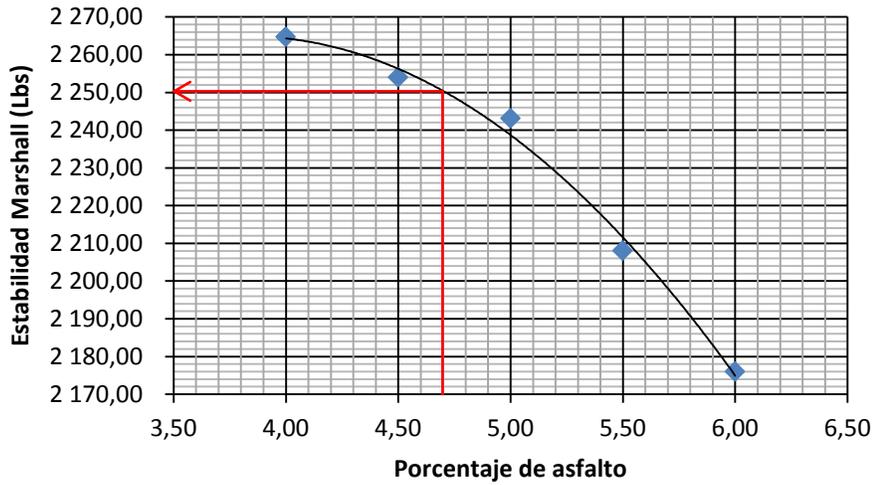


VFA *versus* contenido de asfalto

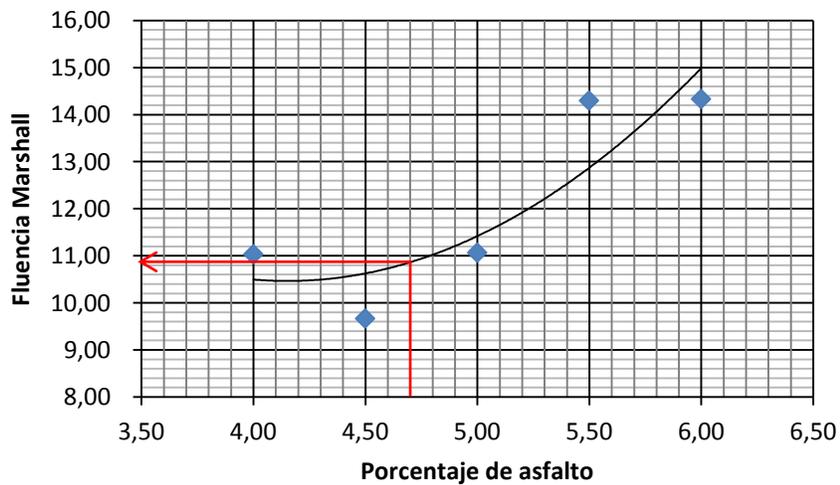


GRÁFICAS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA TMN 19 mm

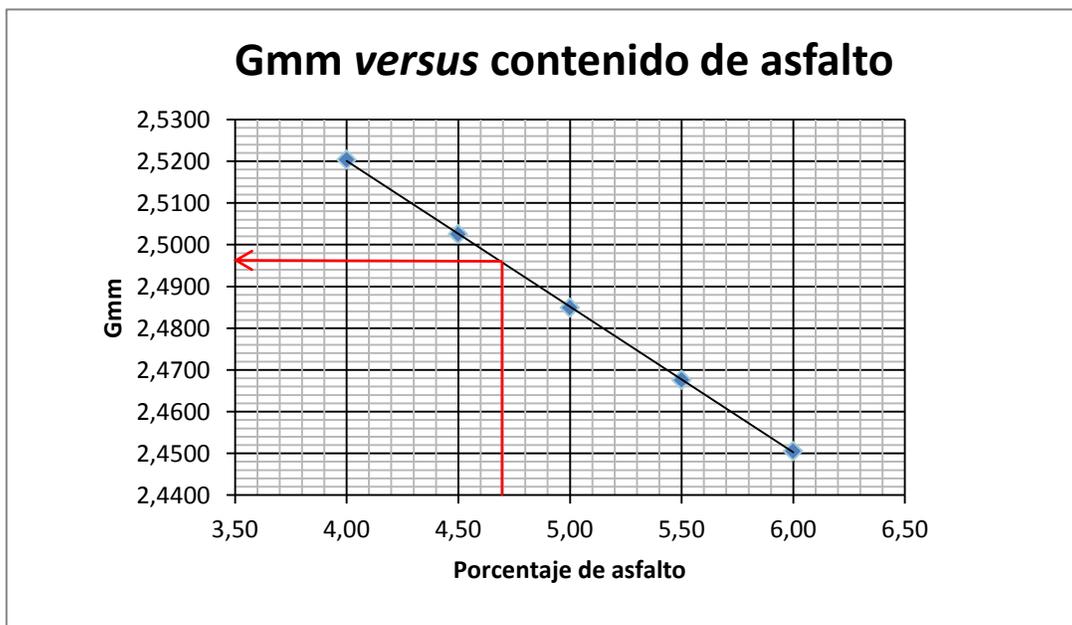
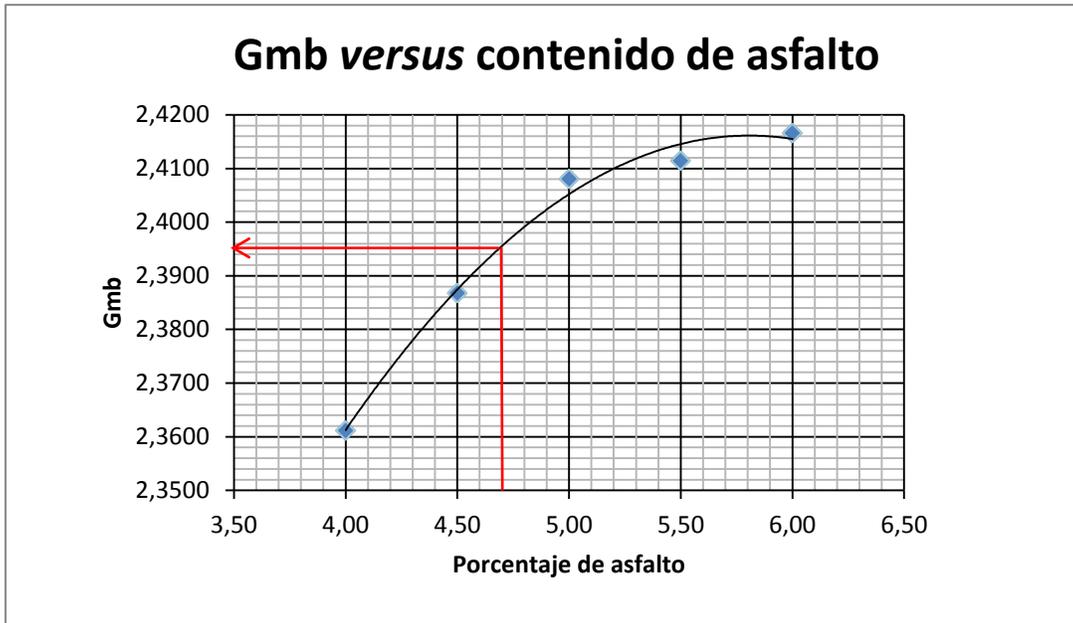
Estabilidad *versus* contenido de asfalto



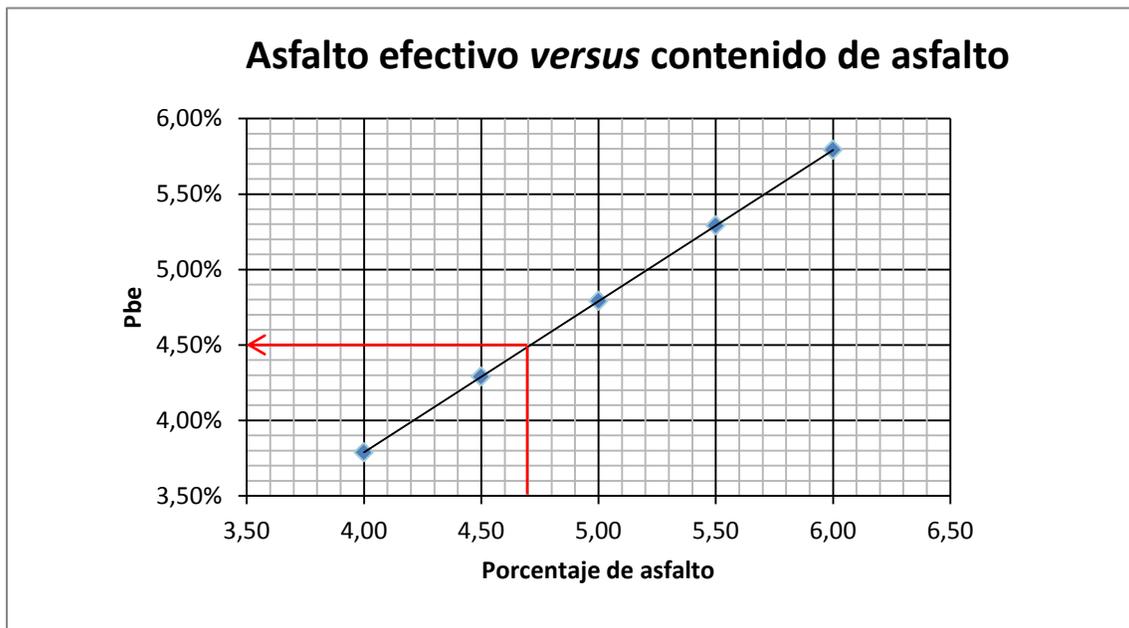
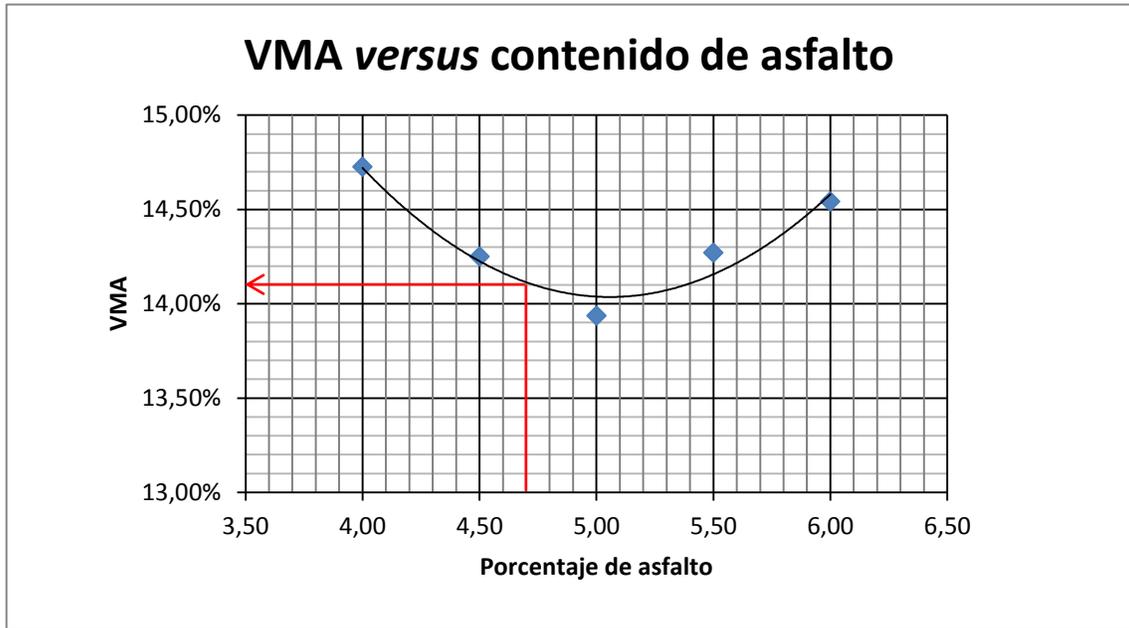
Fluencia *versus* contenido de asfalto



GRÁFICAS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA TMN 19 mm



GRÁFICAS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA TMN 19 mm



GRÁFICAS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA TMN 19 mm

