



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

ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, Marzo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN
CONDICIONES DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Martinoly Godínez Orozco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
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:

ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2017.

Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno

Guatemala jueves 25 de abril de 2017.

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del área de Materiales y
Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: " Envejecimiento de mezclas asfálticas, en condiciones de Laboratorio." elaborado por el estudiante Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno con carné 2003 - 12818, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y de las conclusiones del mismo.

Atentamente,



Yefry Valentín Rosales Juárez
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 7177

Yefry Valentín Rosales Juárez
Colegiado no. 7177
Ingeniero Civil



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
11 de agosto de 2017

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno quien contó con la asesoría del Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2018

/mmm.

Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 080.2018

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: **ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Roberto Yoshiaki Tanimoto Moreno**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Ángel Roberto Sic García
Decano en Funciones

Guatemala, marzo de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por otorgarme la oportunidad de culminar mis estudios, alcanzar una etapa más de mi vida y se la luz que me ha guiado.
- Mis padres** Akihito Tanimoto Tanimoto y Silvia Noemí Moreno de Tanimoto, por su amor incondicional, incansable sacrificio y la fe que nunca perdieron en mí; este logro se los dedico con todo mi amor.
- Mis hermanos** Javier Akihito Tanimoto Moreno y Andrés Hiroshi Tanimoto Moreno, por estar siempre conmigo, apoyándome siempre en la realización de mis sueños e ideales.
- Mi Familia** Por su motivación en todo lo que me propongo y por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por recibirme en tan prestigiosa casa de estudios y ser un lugar de oportunidades.

Facultad de Ingeniería

Por permitirme pertenecer a ella y en sus aulas adquirir la mayor cantidad de conocimientos.

Ingeniero Yefry Valentín Rosales Juárez

Por su tiempo, apoyo y orientación en el desarrollo y culminación de este trabajo de graduación.

Al laboratorio de asfaltos de la facultad de ingeniería, en especial al Ingeniero José Istupe.

Por su colaboración activa en el desarrollo de la presente investigación y la supervisión en los Ensayos realizados en el laboratorio, ya que sus comentarios y sugerencias contribuyeron en este trabajo.

A los Ingenieros Álvaro Guillermo, Rolando Ríos y Omar Medrano

Por sus aportes en el desarrollo de este proyecto y por compartir sus amplios conocimientos y experiencia.

Mis Amigos

Son tantas las personas especiales que desearía enumerar pero no hay suficiente espacio; a quienes me acompañaron en un determinado momento de esta etapa de mi vida, les estoy totalmente agradecido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Referencias Históricas.....	1
2. DEFINICIÓN.....	13
2.1. El fenómeno de envejecimiento.....	13
2.1.1. Definición de envejecimiento	15
2.1.2. Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento.....	16
2.1.2.1. Variables Intrínsecas	16
2.1.2.1.1. Asfalto	16
2.1.2.1.2. La película de asfalto....	17
2.1.2.1.3. Los agregados.....	18
2.1.2.1.4. El contenido de vacíos con aire.	20
2.1.2.2. Variables extrínsecas	22
2.1.2.2.1. Temperatura	22
2.1.2.2.2. La humedad.....	23
2.1.2.2.3. Radiación UV.....	25
2.1.2.2.4. Tiempo de exposición...	27
2.2. Pruebas de envejecimiento Acelerado	29

2.2.1	Envejecimiento de cementos asfálticos.....	29
2.2.2.	Pruebas de envejecimiento acelerado en mezclas asfálticas	31
2.2.2.1.	Tratamiento de calor extendido en laboratorio	32
2.2.2.2.	Tratamiento de oxidación	34
2.2.2.3.	Tratamiento de fotodegradación.....	40
2.2.2.4.	Tratamiento a exposición a la caña de azúcar.....	43
2.2.2.5.	Evaluación del envejecimiento en condiciones de campo.....	45
2.3.	Métodos de envejecimiento: modelos que predicen el envejecimiento de un pavimento flexible.....	47
2.3.1.	Modelo de Donke (1997)	49
2.3.2.	Determinación de energía de activación en cementos asfálticos.....	51
2.3.3.	Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL)	53
2.3.4.	Efecto de la radiación solar y de la temperatura ambiente, en el comportamiento térmico de los pavimentos en el proceso de envejecimiento.....	55
2.4.	Efectos del envejecimiento en el desempeño de las mezclas Asfálticas.....	60
2.4.1.	Módulos.....	60
2.4.2.	Ahuellamiento.....	60
2.4.3.	Fatiga	62
2.4.4.	Agrietamiento térmico.....	64
2.4.5.	Viscosidad	65
3.	DEFINICIÓN DEL EXPERIMENTO	67

3.1.	Mezcla asfáltica	67
3.1.1.	Granulometría y mezcla de agregados	67
3.1.1.1.	Granulometría (ASTM C - 71).....	67
3.1.1.2.	Mezcla de agregados	67
3.1.2.	Diseño de mezcla asfáltica	68
3.1.2.1.	Método Marshall (ASTM D - 1559)	69
3.1.2.2.	Preparación de probetas	69
3.1.2.3.	Procedimiento del Ensayo	70
3.1.2.3.1.	Determinar la densidad aparente.....	73
3.1.2.3.2.	Ensayo de estabilidad y flujo	73
3.1.2.3.3.	Determinación de la densidad máxima teórica.....	75
3.1.2.3.4.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.....	76
3.2.	Ensayo de contenido de asfalto (ASTM D - 2172).....	77
3.3.	Ensayo de recubrimiento y peladura de asfalto en agregados (ASTM D - 3625).....	78
3.4.	Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 159/86) ..	79
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	85
4.1.	Equipo a utilizar	85
4.2.	Datos y cálculos efectuados	90
4.3.	Resultados obtenidos	129
4.4.	Gráficas y tablas.....	131
4.5.	Análisis de resultados.....	149
4.5.1.	Resultados Ensayo Marshall	149

5.5.2.	Resultados Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste	154
CONCLUSIONES.....		161
RECOMENDACIONES		163
BIBLIOGRAFÍA.....		165
APÉNDICES.....		171
ANEXOS.....		177

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas.....	21
2.	Etapas en el proceso de envejecimiento (Read&Whiteoak, 2003).....	28
3.	Crecimiento de la banda infrarroja de Carbonilo a diferentes temperaturas en un asfalto AC - 20.	37
4.	Susceptibilidad al endurecimiento en mezclas asfálticas con dos asfaltos diferentes, dos agregados diferentes y tratamientos diferentes.	38
5.	Espectro infrarrojo banda sulfoxidos. Temperatura 60 °C, 12 horas de exposición, asfalto 60/70.....	39
6.	Índice de envejecimiento a 140 °C con diferentes porcentajes de vacíos.....	46
7.	Relación de módulos de envejecimiento para tres mezclas asfálticas, a) al 88 % y b) al 94 % de compactación.	60
8.	Pérdida de conformidad con respecto al resultado de <i>Wheel Tracking</i>	62
9.	Vida de fatiga de tres mezclas asfálticas, a) al 88 % y b) al 94 % de compactación.	63
10.	Viscosidad dinámica al endurecimiento con el tiempo de un asfalto AC - 20 a cuatro temperaturas.	65
11.	Cambio de la viscosidad debido a la oxidación en PAV, de dos asfaltos diferentes.	66
12.	Prensa de estabilidad Marshall	86
13.	Cabeza de estabilidad Marshall	87

14.	Moldes de compactación Marshall.....	87
15.	Martillo de compactación	88
16.	Pedestal de compactación	88
17.	Baño de circulación de agua.....	89
18.	Picnómetro de vacíos	89
19.	Extractor de la centrifuga de asfaltos.....	90
20.	Estabilidad Marshall vs. agua a temperatura ambiente.	131
21.	Deformación Marshall vs. agua a temperatura ambiente.....	132
22.	Estabilidad Marshall vs. agua a temperatura de 60 °C.	132
23.	Deformación Marshall vs. agua a temperatura de 60 °C.	133
24.	Estabilidad Marshall vs. horno a temperatura de 100 °C.....	133
25.	Deformación Marshall vs. horno a T = 100 °C.	134
26.	Estabilidad Marshall vs. agua con caña.....	134
27.	Deformación Marshall vs. agua con caña.	135
28.	Estabilidad Marshall vs. agua con carbonato de sodio.	135
29.	Deformación Marshall vs. agua con carbonato de sodio.	136
30.	Estabilidad Marshall vs. agua con sal.	136
31.	Deformación Marshall vs. agua con sal.	137
32.	Estabilidad Marshall vs. agua a temperatura de 10°C.....	137
33.	Deformación Marshall vs. agua a temperatura de 10°C.	138
34.	Estabilidad Marshall vs. congelador a temperatura de - 3°C.....	138
35.	Deformación Marshall vs. congelador a temperatura de - 3°C.	139
36.	Estabilidades Marshall.	140
37.	Deformaciones Marshall.	141
38.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua a temperatura ambiente.	142
39.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua a temperatura de 60 °C.....	142

40.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua a temperatura de 10 °C.	143
41.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta en congelador a temperatura de - 3°C.	143
42.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta en horno a temperatura de 100 °C.	144
43.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua con caña.	144
44.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua con carbonato de sodio.	145
45.	Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshall vs. probeta de agua con sal.	145

TABLAS

I.	Pruebas de envejecimiento de asfaltos y métodos de evaluación (Bell, 1989).	2
II.	Métodos de envejecimiento acelerado de cementos asfálticos.	30
III.	Métodos utilizados para evaluar el envejecimiento por temperatura de las mezclas asfálticas.	33
IV.	Métodos para evaluar el envejecimiento por oxidación en mezclas asfálticas.	35
V.	Cambios en la composición de los grupos químicos de tres asfaltos después de envejecimiento por absorción de oxígeno (OAA).	40
VI.	Métodos para evaluar el envejecimiento por efectos de luz y radiación en mezclas asfálticas.	41
VII.	Gravedad específica BULK y densidad de la mezcla asfáltica.	129
VIII.	Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos.	129

IX.	Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen	129
X.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los cinco días.....	130
XI.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los diez días.	130
XII.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los quince días.	131
XIII.	Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de cinco días.	146
XIV.	Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de diez días.....	147
XV.	Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de quince días.....	148
XVI.	Relación estabilidad y fluencia de probeta Marshall	149
XVII.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en agua a temperatura ambiente.	150
XVIII.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua a una temperatura de 60 °C.....	150
XIX.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua a una temperatura de 10 °C.....	151
XX.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Congelador a una temperatura de - 3 °C.	151
XXI.	Relación de estabilidad y fluencia de probeta en Horno a una temperatura de 100 °C.....	152
XXII.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Caña.	152

XXIII.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Carbonato de Sodio.....	153
XXIV.	Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Sal.....	153
XXV.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura ambiente.....	154
XXVI.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura de 60 °C.....	154
XXVII.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura de 10 °C.....	155
XXVIII.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en congelador a temperatura de - 3°C.....	155
XXIX.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en horno a temperatura de 100°C.....	155
XXX.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en agua con caña.....	156
XXXI.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua con Carbonato de Sodio.	156
XXXII.	Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua con Sal.....	156
XXXIII.	Comparación de valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre Agua a temperatura ambiente, Agua a temperatura de 60 °C y Agua a temperatura de 10 °C.....	157
XXXIV.	Comparación de los valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre Agua a temperatura ambiente, Agua con Caña, Agua con Carbonato de Sodio y Agua con Sal.....	158

XXXV. Comparación de los valores obtenidos por medio del Ensayo de
Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre congelador a una
temperatura de -3 °C y Horno a una temperatura de 100 °C..... 159

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
δ	Ángulo de Fase.
POV	Cámara de presión de oxígeno.
AC-20	Cemento Asfáltico.
Isc	Constante Solar.
KPa	Kilo pascal ($10^3 Pa$)
MPa	Mega pascal ($10^6 Pa$).
μm	Micro-metro ($1 m = 1\,000\,000\mu m$).
G^*	Módulo Complejo.
G'	Módulo de Almacenamiento.
G''	Módulo de Pérdidas.
Pa	Pascal, es la unidad de presión del sistema internacional de unidades. Se define como la presión

que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma.

A	Probeta en agua a una temperatura ambiente.
AF	Probeta en agua a una temperatura de 10 °C.
AC	Probeta en agua a una temperatura de 60 °C.
AÑ	Probeta en agua con caña, una relación de 1 : 1.
AS	Probeta en agua con carbonato de sodio, Molar 1, 106 grs./litro.
ASAL	Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs./litro.
C	Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C.
H	Probeta en horno a una temperatura de 100 °C.
M1	Probeta Marshall 1.
IR	Rangos de longitud de onda infrarroja.
UV	Rangos de longitud de onda ultravioleta.
VIS	Rangos de longitud de onda visible.

GLOSARIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
Absorbancia	Porción de luz incidente que logra atravesar una muestra, manteniendo una longitud de onda determinada; se expresa por medio de la ecuación intensidad de luz de la muestra sobre intensidad del rayo que incide.
Ácidos carboxílicos	Constituyen un grupo de compuestos, caracterizados porque poseen un grupo funcional llamado grupo carboxilo o grupo carboxi.
Actínica	Acción química de las radiaciones electromagnéticas, en especial las luminosas.
Adhesión	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 fuerza intermoleculares.
Agehardening	Proviene del inglés, que significa "Endurecimiento por envejecimiento".
Aging	Proviene del inglés, que significa "Envejecimiento".

Anhídridos	También reciben el nombre de óxidos no metálicos u óxidos ácidos. Se trata de compuestos químicos de tipo binario que surgen al combinarse un elemento no metálico con oxígeno.
<i>Anti-stripping</i>	Antidesprendimiento de la película de asfalto, debido a la reducción de adhesión.
Áridos	Materiales rocosos naturales que se usan para hacer el hormigón, es decir, la grava y la arena.
Asfáltenos	Familia de compuestos químicos orgánicos del petróleo crudo; representan los compuestos más pesados y, por lo tanto, los de mayor punto de ebullición.
Asfaltos	Mezcla sólida y compacta de hidrocarburos y de minerales que mayormente es empleada para construir el pavimento de las calzadas.
ASTM	<i>American Society for Testing Materials.</i>
Bituminosos	Sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.

Cemento asfáltico	Utilizado en la mayor parte en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, ya que para ser trabajado es necesario un calentamiento. Se obtiene por la refinación de residuos de petróleo provenientes de los aceites y los combustibles, los cuales sirven de aglutinante en el concreto asfáltico.
Condiciones de confort	Aquello que brinda comodidades y genera bienestar.
<i>Cracking</i>	Proviene del inglés, que significa "Agrietamiento".
DSR	<i>DynamicShearRheometer.</i>
Ductilidad	Propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse, permitiendo obtener alambres o hilos de dichos materiales.
Espectroscopia de infrarrojo	Tipo de espectrometría de absorción que utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético. Como las demás técnicas espectroscópicas, puede ser utilizada para identificar un compuesto o investigar la composición de una muestra.
EVA	Etileno Vinil Acetato.

Exudación	Salida de un líquido de un cuerpo o del recipiente en que está contenido, por transpiración o a través de sus rendijas.
<i>Fíller</i>	Proviene del inglés, que significa "Material para relleno".
Flujo viscoso	Los fluidos reales siempre experimentan al moverse ciertos efectos debidos a fuerzas de rozamiento o fuerzas viscosas. Así, la viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas del fluido.
Fotones	Es la partícula responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético, porque es portadora de todas aquellas formas de radiación electromagnética, entre las que se incluyen los rayos gamma, los rayos x, la luz ultravioleta, la luz infrarroja, las ondas de radio, las microondas, entre otras.
Hidrocarburos	Son compuestos orgánicos, en la tierra, formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono y átomos de hidrogeno. Los hidrocarburos son los compuestos básicos de la química orgánica.

Inertes	Se utiliza para describir algo que no es químicamente reactivo.
<i>in situ</i>	Expresión latina que significa "en el sitio" o "en el lugar", y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.
Iones	Es un átomo o un grupo de átomos que, ya sea por la circunstancia de haber perdido o ganado electrones, se sumaron una carga eléctrica, es decir, los iones son átomos que no son neutros en materia eléctrica.
Mástic o mástico	Mezcla de betún y elementos minerales, realizada con una dosificación que facilita su extensión en caliente o en frío, de modo que se obtiene una superficie lisa tras la compactación con una llana. Se emplean cuando se precisa que el acabado de superficies asfálticas, tenga un aspecto homogéneo. El grado de viscosidad del Mástic se obtiene por el agregado de arena triturada.
Parafinas	Denominación general que reciben ciertos sólidos formados a partir de una combinación de hidrocarburos.
PAV	Vaso de envejecimiento a presión, por sus siglas en ingles.

Polimerización	Proceso mediante el cual las moléculas simples o diferentes, reaccionan entre si por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble, triple, etc.
Polímero	Sustancia química que resulta de un proceso de polimerización.
Reflectancia	Propiedad de un cuerpo de reflejar la luz.
Reológicas	Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La geología es una parte de la mecánica de medios continuos.
Rigidez	Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie.
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test.</i>
<i>Rutting</i>	Proviene del inglés, que significa ahuellamiento
SAFT	<i>Stirred Air Flow Test.</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program.</i>
Superpave®	Proviene del inglés " <i>Superior Performing Asphalt Pavements</i> ", el cual designa un pavimento asfáltico cuya composición específica corresponde a

una receta resultante de la investigación sobre pavimentos llevada a cabo en los EEUU entre 1987 y 1993.

TFOT

Thin Film Oven Test.

UCL

Universal de caracterización de ligantes.

Visco-elástica

Adjetivo, que es a la vez elástico y viscoso.

Viscosidad

Consistencia espesa y pegajosa de una cosa.

Volatilización

Hacer pasar un cuerpo del estado sólido o líquido al estado gaseoso.

WRC

World Radiometric Center.

WRR

World Radiometric Reference.

RESUMEN

Uno de los daños superficiales que contribuye al deterioro en el tiempo de las mezclas asfálticas es el proceso de envejeciendo. Este fenómeno es atribuible a variables intrínsecas, o sea las características propias de la mezcla asfáltica, a saber: el cemento asfáltico, los agregados, el contenido de vacíos y la película de asfalto que recubre los agregados. De otro lado, también influyen las variables externas que ofrecen algún tipo de alteración en el proceso de producción de la mezcla, el almacenamiento y transporte y la construcción de la capa asfáltica; ellas se reconocen como variables extrínsecas y son la temperatura de producción de la mezcla, la humedad, la radiación ultravioleta y la temperatura ambiente.

Los mecanismos que intervienen en el proceso están asociados a cambios de orden químico, físico, mecánico y geológico. En general, las alteraciones de orden químico como la volatilización, la oxidación y la polimerización producen un reacomodamiento en la estructura molecular del asfalto y, la manifestación de respuesta a estos cambios, radica en el endurecimiento de las mezclas y, por consiguiente, la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse. La consecuencia de estos cambios es la aparición de grietas por donde se inicia un proceso de ingreso de agua y vapor al interior de la mezcla, lo que conlleva a otros procesos de pérdida de cohesión y daños por humedad, los que reducen el desempeño del pavimento asfáltico.

OBJETIVOS

General

Inducir envejecimiento en mezclas asfálticas, de manera artificial, bajo diferentes condiciones emuladas en laboratorio.

Específicos

1. Conocer el grado de envejecimiento y Desgaste que sufren las mezclas asfálticas expuestas a diferentes condiciones emuladas en laboratorio.
2. Determinar las posibles causas que produce el envejecimiento en mezclas asfálticas.
3. Proporcionar criterios de diseños para mezclas asfálticas en función de las condiciones de envejecimiento y con referencia al Desgaste producido en ellas.

INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de las mezclas bituminosas es uno de los factores que más inciden en el acortamiento de la vida útil de los pavimentos. Sus consecuencias incluyen, tanto la disminución de las condiciones de confort y seguridad, como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimiento y rehabilitación.

En la actualidad, los proyectos de pavimentación asfáltica no consideran conveniente el factor de envejecimiento al establecer sus prescripciones, tampoco las condiciones climáticas a las cuales serán expuestas. Existen pocas empresas que producen mezclas asfálticas, estas cuentan con sus propios diseños y plantas móviles de colocación. Utilizan similares diseños de mezclas asfálticas en distintas regiones. En el presente trabajo realizaremos muestras de mezcla de pavimentación asfáltica preparada en el laboratorio, las cuales serán analizadas para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento, y así conocer el envejecimiento y Desgaste que se produce, las cuales también serán expuestas a ciertas condiciones climáticas controladas en laboratorio, para así lograr reproducir diferentes condiciones existentes.

Los análisis estarán enfocados hacia cuatro características de la mezcla (densidad de la mezcla, vacía de aire, vacía en el agregado mineral, y la influencia que esta pueda tener en el comportamiento de la mezcla.

El plan de trabajo incluye una serie de estudios y Ensayos para analizar el comportamiento de una mezcla patrón, sometidas a envejecimiento acelerado en el Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de

San Carlos de Guatemala. Variando las temperaturas de Ensayo y el grado de envejecimiento, se llevará a cabo el desarrollo experimental, empleando los Métodos de Diseño de Marshall y el Ensayo de Cántabro.

Los Ensayos serán realizados para así tener una idea del proceso de envejecimiento y Desgastes que se produce en un diseño de asfalto determinado, con esto lograremos obtener una referencia de lo que podríamos esperar de ciertos diseños de asfaltos colocados en ciertas regiones, o cuales estarán expuestas a diferentes variables de condiciones climáticas.

Se han desarrollado algunos métodos de proporcionamiento de asfalto y agregado para la mezcla asfáltica en caliente, siendo los más conocidos los siguientes: Marshall, Hveen, Hubbard-Field y Triaxial de Smith.

En esta investigación se utilizará el Método Marshall, siendo un diseño de mezcla adecuado, generalmente el más económico y el que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

1. ANTECEDENTES

1.1. Referencias Históricas¹

La primera documentación acerca del estudio del envejecimiento del asfalto fue realizada por Dow en 1903, quien relacionó el calentamiento del asfalto extraído de mezclas asfálticas con la reducción de su peso y de los valores de la penetración.

De otra parte, en la industria del petróleo en 1921 se estudió el efecto de varios catalizadores en la oxidación de dos crudos y su relación con la cantidad de depósitos generados en los motores de combustión interna, hallando que metales como el zinc y aluminio no incrementan la cantidad de precipitado y que el bronce y el cobre causan una notable aceleración de la oxidación en contraste con el hierro, níquel, cobalto y acero.

En la década de los treinta los investigadores se enfocaron en el estudio del fenómeno de endurecimiento de los asfaltos debido al envejecimiento a corto y largo tiempo. El método de envejecimiento empleado se basó en el calentamiento de los asfaltos soplados con aire a diferentes tiempos y temperaturas. Los cambios fueron posteriormente detectados mediante la

¹Vargas, Xiomara, Reyes, Freddy, *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*, P. 27.

estimación del grado de endurecimiento obtenido a partir de valores de propiedades empíricas como la penetración y la ductilidad de los asfaltos².

En los años cuarenta se introduce el método de envejecimiento en película fina (TFOT, *Thin Film Oven Test*), definiéndose el concepto de índice de envejecimiento que relaciona la viscosidad medida antes y después del envejecimiento de la muestra de asfalto, cuyo uso se extendió por varios años, hasta nuestros días. En esta misma década de empieza a correlacionar el envejeciendo de asfaltos en servicio y en laboratorio.

Paralelo a estas investigaciones, Thurston³ estudiaron los constituyentes de los asfaltos y su oxidación (foto-oxidación) a diversas temperaturas de servicio. La metodología consistió en exponer muestras de asfaltos contenidos en recipientes de pírax sellados y llenos de oxígeno bajo lámparas a temperaturas aproximadas a 77 °C. Identificaron constituyentes como asfáltenos, resinas, parafinas y compuestos nafténicos típicos de los residuos del petróleo, notando que todos estos compuestos absorbían oxígeno, especialmente los nafténicos y las resinas. Aplicaron este método a asfaltos utilizados en recubrimientos y pavimentación.

Tabla I. **Pruebas de envejecimiento de asfaltos y métodos de evaluación (Bell, 1989).**

Fecha	Investigador (es)	Método de envejecimiento	Método de evaluación
1903	Dow	Mezcla asfáltica envejecida durante, 18 y 24 h a 163 °C, 30 min. a 149 °C	Cambio en el peso y la penetración del residuo recuperado del asfalto
	Nicholson	Asfalto soplado con aire durante 15 min. A 229°C	Cambio en la penetración y ductilidad
1937	Raschig y Duyle	Asfalto soplado con aire	Cambio en la penetración

²WELBOM, J. Y., *Relationship of Asphalt Cement Properties to Pavement Durability.*, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis 59 Washington, D.C. 1979.

³THURSTON, R. R., Knowles, E. C., *Asphalt and its Constituents. Oxidation at service Temperatures.* Ind. Eng. Chem. Vol. 33 No. 3, 1941, p. 320-324.

		durante 15 min. A 204 °C	y ductilidad
	Hubbard y Gollomb	Envejecimiento de mezcla asfáltica de Ottawa con variación de tiempo y temperatura	Cambio en la penetración del asfalto recuperado
1939	Lang y Thomas	Envejecimiento en horno de mezcla asfáltica Ottawa y exposición al aire libre	Cambio en las propiedades de la mezcla, Abrasión
1940	Shattuck	Envejecimiento de mezcla durante 30 min. A 163 °C	Penetración, ductilidad y punto de ablandamiento del asfalto recuperado
	Lewis y Welborn	Envejecimiento acelerado en película fina, TFOT durante 5 h a 163 °	Cambio en el peso , penetración y ductilidad
1946	Lewis y Halstead	Envejecimiento acelerado en película fina, TFOT durante 50 min a 163 °	Cambio en el peso, penetración y ductilidad
1952	Pauls y Welborn	Mezcla asfáltica de Ottawa envejecida en TFOT a 163 °C	Fuerza de compresión del asfalto recuperado y residuo TFOT
1955	Griffin, Miles y Penther	Prueba de envejecimiento de película de asfalto de 0,0002 in durante 2 h a 107 °C	Viscosidad antes y después del envejecimiento, índice de envejecimiento
1957	Vallerga, Monismith y Granthem	Ultravioleta e infrarrojo	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad
	Brown, Sparks y Smith	Enfriamiento rápido de muestras de asfalto	Prueba de tensión en muestras de asfalto
1958	Heithaus y Johnson	Envejecimiento en carretera y pruebas en laboratorio. Envejecimiento de micropelículas	Índice de envejecimiento de micropelículas de asfalto recuperado
1961	Traxler	Prueba TFOT y micropelículas de 0,0006 in durante 2 h a 107 °C	Comparación de viscosidad a 77 °F (25°C)
	Halstead y Zenewitz	Prueba TFOT y micropelículas de 0,0006 in durante 2 h a 107 °C	Comparación de viscosidad a 77 °F (25°C) a velocidad de corte constante de 0.05 s ⁻¹
1963	HveemZube y Skog	Prueba micropelícula modificada de 0.0008 in durante 24 h a 99 °C Prueba RTFOT y TFOT durante 50 min. a 163 °C	Viscosidad a 77°F (25°C) antes y después del envejecimiento y comparación de viscosidades de RTFOT, TFOT de asfalto recuperado
1968	Lee	Prueba TFOT a 163°C en asfaltos y mezclas asfálticas	Viscosidad a 77 °F (25°C) tiempo de endurecimiento a 30 mega-poises. Índice de corte. Contenido de

			asfáltenos.
1969	Schmidt y Santucci	Prueba de micropelícula giratoria en 0,0008 in a 99°C	Viscosidad del residuo de asfalto
1973	Lee	Prueba TFOT a 65,56 °C y 20 atm. Materiales envejecidos recuperados de campo	Viscosidad a 77°F (25 °C) Viscosidad capilar a 140 °F Ductilidad Prueba Fraass, Contenido de asfáltenos Porcentaje de oxígeno Análisis Rostler
1976	Benson	Prueba TFOT. Luz actínica (efecto de reacción foto-química). Mezclas envejecidas en campo	Viscosidad a 77 °F, Penetración a 77 °F
	Plancher, Green y Petersen	Prueba RTFOT. Columna de oxidación. Mezcla envejecida durante 5 h, 150 °C. Asfaltos y mezclas tratadas con y sin sal	Viscosidad a 77 °F (25°C). Determinación de asfáltenos. Análisis químico. Módulo elástico
1977	Kumar y Goetz	Permeacion por aire a 60 °C con una cabeza de 0.02 in de agua (0,5 mm) durante 1, 2, 4, 6 y 10 días	Pruebas de fluencia a 70 °F ± 3°, 5 psi durante 5 min. La pendiente y el intercepto de la curva de fluencia es usada para indicar el progreso de la oxidación. El intercepto a X días de la pendiente inicial se considera como el índice de durabilidad
1981	Kemp y Predoehl	Luz actínica (efecto de reacción foto-química). Prueba de micropelícula rotatoria. Envejecimiento de mezclas asfálticas. Mezclas recuperadas de campo	Penetración a 77 °F. Ductilidad a 77 °F Módulo elástico. Micro viscosidad a 77 °F Viscosidad capilar a 140 °F
	Santucci, Goodrich y Sundberg	Prueba de durabilidad a 235 °F durante 168 h y a 115°C durante 100 h	Viscosidad a 6 °C y 135 °C. Penetración a 4 °C y 25 °C. Ductilidad a 25 °C
1983	Mc Hattie	Prueba RTFOT durante 100 h a 115 °C	Penetración a 77 °F. Viscosidad cinemática a 275 °F. Módulo elástico EAL (eje equivalente de carga)
1985	Edler et al.	Envejecimiento de película de asfalto de 100 micras en weatheometer. Prueba RTFOT durante 8 h. Presión de oxidación de 300 psi durante 96 h a 149 °F. Prueba TFOT modificada - película de asfalto de 100	Viscosidad a 113 °F micro viscosímetro de plato, velocidades de corte de 0,05 s ⁻¹ . Nivel de oxidacion, espectro infrarrojo. Constituyentes de peso molecular alto

		micras durante 24 h	
	Hugo y Kennedy	Horno de envejecimiento por endurecimiento de mezclas a 100 °C. Exposición de mezclas a ultravioleta durante 54 h y 14 días	Viscosidad a 77 °F compresión de vigas de mezcla
1986	Kim et al.	Presión de oxidación a 140 °F y 100 psi, de 0 a 5 días. Recuperación de materiales envejecidos en campo	Viscosidad capilar a 140 y 275 °F. Pruebas de penetración y Fraass. Módulo elástico y fatiga. Análisis de Corbett-Swerbrick
1988	Von Quintas et al.	Envejecimiento en el horno durante corto tiempo a 135 °C durante 8, 16, 24 y 36 h. Oxidación bajo presión durante tiempo largo a 60 °C y 100 psi. Envejecimiento en horno durante 2 días a 57, 22 °C. Después de 5 días a 107 °C	Módulo de elasticidad. Prueba de fluencia bajo tensión indirecta (<i>Indirect tensile strain creep</i>)
	Tia et al.	Envejecimiento en horno convectivo a 140 °F (60°C) durante 1, 7, 28 y 90 días. Envejecimiento forzado en horno a 140 °F (60 °C) durante 1, 7, 28 y 90 días. Envejeciendo con ultravioleta a 140 °F (60°C) durante 1, 7, 28 y 90 días. Envejeciendo bajo condiciones naturales durante 1, 2 y 3 años	Módulo elástico. Resistencia a la tracción indirecta. Propiedades de asfaltos recuperados como: Viscosidad a 140 °F (60 °C), penetración a 77 °F (25°C). ReómetroSchweyer a 77 °F y 59 °F (15 °C). Análisis infrarrojo. AnálisisCorbett-Swarbrick
1989	Petersen	Prueba de envejecimiento en película fina (TFOT)	Pérdida de peso debida a la volatilización. Contenido de cetonas. Viscosidad.

Fuente: Elaboración propia con base en VARGAS, Xiomara, REYES, Freddy, *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*.

Un año más tarde, y con base en el hecho de que el estudio del envejecimiento de los materiales bituminosos se enfoca solamente en el

endurecimiento⁴, Ebberts en 1942 complemento el del envejecimiento de los asfaltos considerando la oxidación como el factor más influyente de este fenómeno. Oxido películas delgadas de asfaltos con permanganato de potasio descartando la utilización de luz ultravioleta empleada por otros investigadores en la misma década, y confirmo que las fracciones de resinas y naftenicos del asfalto se oxidan rápidamente, notando que la demanda de oxígeno decrecía marcadamente en asfaltos como más alta viscosidad.

En las décadas de los setenta y ochenta el uso de las pruebas de envejecimiento de asfaltos en película fina se hizo extensivo, presentándose varias modificaciones del método hasta finales de los años ochenta. Los investigadores notaron que el nivel de envejecimiento por endurecimiento de las pruebas desarrolladas eran menor que el ocurrido bajo condiciones reales. Dentro de los métodos de evaluación empleados en estas dos décadas se incluyen parámetros como el contenido de asfaltenos, porcentaje de oxígeno y análisis químico, así como la evaluación de módulos elásticos, pruebas de fluencia y cálculo de la relación de módulos estimados antes y después del envejecimiento.

El proceso de envejecimiento de los materiales asfálticos inicialmente se consideró como un fenómeno de endurecimiento del material y fue evaluado con los cambios observados en la ductilidad, disminución de la penetración y del peso del asfalto. En la década de los años cuarenta los investigadores identificaron los constituyentes de los asfaltos como la fracción de asfaltenos, resinas, nafténicos y parafinas, y concluyeron, así mismo, que el envejecimiento

⁴HUMMARD, P., GOLLUMB, H., *The Hardening of Asphalt with Relation to Development of Cracks in Asphalt Pavements.*, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists* Vol.9, 1937, p. 165-194.

no se debe solamente al endurecimiento físico, sino también a procesos oxidativos.

En la década siguiente se introdujo el concepto de índice de envejecimiento, evaluando a partir de valores de viscosidad capilar estimados antes y después del proceso de oxidación. Se buscó, de igual modo, encontrar una relación entre la composición química de los asfaltos y su viscosidad. Diez años más tarde se estudió el efecto de la oxidación en el cambio del contenido de las fracciones genéricas de los asfaltos apoyado en resultados de espectroscopía de infrarrojo.

En los setenta se empezó a implementar la evaluación reológica de los asfaltos a partir de determinaciones del módulo de elasticidad y curvas de fluencia. Se continuó con la estimación de las viscosidades capilares, ductilidad y la penetración como indicadores de cambio de los procesos oxidativos pese a que estas pruebas son totalmente empíricas e inadecuadas para describir las propiedades visco elásticas lineales de los asfaltos.

En la década de los ochenta los investigadores continuaron con mediciones de penetración y ductilidad, y utilizaron el viscosímetro de plato para hacer determinaciones de viscosidad. Años más tarde se empezó a evaluar la respuesta visco elástica de los materiales bituminosos con el fin de relacionar sus propiedades físicas y químicas, y fundamentalmente para desarrollar una especificación de los asfaltos que se relacionara con su desempeño a partir de propiedades mecánicas determinadas con reómetros de corte dinámico.

En el marco del programa SHRP se desarrollaron nuevos procedimientos y equipos para evaluar las propiedades reológicas de los materiales bituminosos. El viscosímetro rotacional de Brookfield reemplazo los

viscosímetros de tubo capilar con el fin de determinar curvas de viscosidad-temperatura para estimar las propiedades de los asfaltos a temperaturas de mezclado, compactación y bombeo. El reómetro de corte dinámico (DSR) fue seleccionado para medir la rigidez de los asfaltos a temperaturas altas e intermedias alcanzadas en los pavimentos, y el reómetro de viga de torsión fue elegido para medir las propiedades de flujo de los pavimentos asfálticos a bajas temperaturas.

Con esto dos dispositivos se intentan medir las propiedades reológicas de los asfaltos en un amplio rango de temperaturas y tiempo de carga y han sido utilizados por diversos investigadores.

Por su parte, Choplin y Marchal (1996, 1997 y 1999) desarrollaron el concepto de reo-reactor para hacer el seguimiento *in situ* de procesos físicos y químicos. La metodología aplicada se basa en la reproducción o simulación de un proceso o de una de sus partes en mini o micro-reactores acoplados a reómetros, y el instrumento equipado de esta forma se denomina reómetro de procesos. En las investigaciones realizadas la primera etapa consiste en la búsqueda de informaciones reológicas pertinentes, y posteriormente, en un seguimiento reológico *in situ*.

Una de las aplicaciones del reo-reactor llevado a cabo por Choplin y Marchal (1999) es la formulación de un asfalto modificado con polímero y azufre evaluado a través del cambio de la viscosidad a partir del uso de un mezclador tipo cinta helicoidal bajo rotación estable. Los investigadores lograron seguir el efecto de la incorporación de otros compuestos durante el proceso de formulación, que en este caso consiste en la dispersión y el entrecruzamiento mediante el monitoreo de valores absolutos de la viscosidad.

Una vez finalizado el proceso de formulación, evaluaron el desempeño del material mediante pruebas oscilatorias con el mismo dispositivo de mezclado y el módulo complejo (G^*) fue determinado como una función de la temperatura, logrando obtener los datos del criterio de deformación permanente (*rutting*) propuesto por SHRP en un tiempo mínimo y sin necesidad de muestreo.

Investigadores como Airey⁵, Navarro⁶ y Ruan⁷, entre otros, encontraron que las respuestas reológicas de los asfaltos puros y modificados dependen de las condiciones de oxidación, y coinciden con otros autores en que la oxidación del asfalto en el laboratorio a altas temperaturas puede influenciar en la geología del material de manera diferente a cuando la oxidación es alcanzada bajo condiciones reales.

Los resultados del estudio del efecto de la oxidación TFOT (*Thin Film Oven Test*) y RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) en la geología de asfaltos puros y modificados reportados en otras publicaciones, coinciden en un incremento del Módulo complejo (G^*), del módulo de almacenamiento (G'), del módulo de pérdidas (G'') y una disminución del ángulo de fase (δ) después del envejecimiento por oxidación.

Adicionalmente detectaron que el envejecimiento tiene un efecto mínimo en los valores de los módulos de los asfaltos obtenidos a bajas temperaturas (< 0 °C) pero a temperaturas superiores (0 - 70 °C), observando un marcado

⁵ AIREY, G. D., RAHIMZADEH, B., *Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties.*, *Construction and Building Materials*, Vol. 18, 2004, p. 535-548.

⁶ NAVARRO, F., PARTAL, P., MARTÍNEZ-BOZA, F., GALLEGOS, C., *Thermorheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens.*, *Fuel*, Vol. 83, 2004, p. 2041-2049.

⁷ RUAN, Y., DAVISON, R., R., GLOVER, C., J., *The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts.*, *Fuel*, Vol. 82, No.14, 2003, p. 1763.1773.

descenso del ángulo de fase y concluyendo que los módulos dinámicos de los asfaltos son menos susceptibles a la temperatura después del envejecimiento⁸.

Lesueur⁹ propuso que las propiedades reológicas de los asfaltos requeridas para obtener un buen desempeño del material, deben incluir buena facilidad de bombeo a altas temperaturas (160 °C), suficiente rigidez a elevadas temperaturas de servicio (60 °C) para evitar el flujo viscoso, y ser adecuadamente blando a bajas temperaturas de servicio para resistir a las fisuras por fatiga del material. Conseguir estas características de manera simultánea en los materiales bituminosos no es fácil, por eso se recurre a la modificación de los asfaltos y se seguirá planteando en futuras investigaciones.

Autores como Sirin¹⁰, encontraron inconvenientes cuando intentaron evaluar asfaltos modificados con polímeros mediante la técnica RTFOT, como son, envejecimiento irregular, formación de películas en la superficie del asfalto y no homogeneidades en los sistemas asfalto-polímero. Bahia¹¹, documentaron un nuevo protocolo RTFOT para asfaltos modificados. Otra alternativa de método de envejecimiento ha sido propuesta por Glover¹², quienes plantearon un nuevo método para simular el envejecimiento al que es sometido el asfalto en las plantas de mezclado en caliente, denominado SAFT (*Stirred Air*

⁸ LU, X., ISACSSON, U., *Effect of ageing on bitumen chemistry and Rheology.*, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, 2002, p. 15-22.

⁹ LESUEUR, D., *La Rhéologie des Bitumes: Principes et Modification.*, *Rhéologie*, Vol. 2, 2002, p. 1-30.

¹⁰ SIRIN, O., TIA, M., RUTH, B., *Evaluation of an improved Rotavapor aging apparatus using a Morton flask for simulation of hot-mixing on modified asphalts.*, *Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. 2000.

¹¹ BAHIA, H., ZHAI, H., RANGEL, A., *Evaluation of stability, nature of modifier, and short-term aging of modified binders using new test: LAST, PAT, and modified TFOT.*, *Transportation Research Record 1638*, *Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D.C. 1998 p. 64-71.

¹² GLOVER, J., DAVISON, R., R., VASSILIEV, N., *New look for asphalt aging device.*, *Texas Transportation, Researcher*, Vol.39, No. 1, 2003, p. 15-19.

FlowTest), el cual oxida los asfaltos mediante agitación y soplado con aire, evitando los problemas encontrados en los asfaltos modificados.

Con este nuevo método los autores intentan eliminar inconvenientes como inconsistencias debidas a la formación de pieles en la superficie del asfalto, dificultades en el procesamiento de asfaltos modificados con polímeros y en la recuperación del asfalto y limpieza de equipos después del Ensayo. El procedimiento dura la mitad del tiempo requerido en RTFOT.

Por su parte, Vargas¹³, relacionaron cambios estructurales de muestras de asfalto sometidas a procesos termo-oxidativos *in situ* a temperaturas elevadas en un reo-reactor con cambios en sus propiedades visco elásticas para obtener información acerca de la evolución de la estructura compleja de los asfaltos inducida por el envejecimiento a partir del seguimiento de propiedades fáciles de determinar, como las propiedades visco elásticas del material.

En la investigación se propuso una nueva metodología de envejecimiento de asfaltos bajo agitación continua en un reo-reactor mediante la cual fue posible hacer un seguimiento *in situ* del cambio de la viscosidad del asfalto a medida que se iba envejeciendo bajo condiciones controladas. Este proceso de envejecimiento *in situ* en el reo-reactor permitió simular los procesos de mezclado en caliente del asfalto bajo condiciones controladas próximas a la realidad.

¹³ VARGAS, X. A., *Determinación de la evolución reológica de las fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento in situ en un reo-reactor.*, Tesis presentada a la Universidad Industrial de Santander para optar el título de Doctor en Ingeniería Química, 2007.

El mínimo del ángulo de fase observado en el diagrama Black del asfalto envejecido manifestó una relajación hacia una mayor estructuración del asfalto debida al envejecimiento.

Sin embargo. Los Ensayos TFOT (*Thin Film Oven Test*) y RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) se siguen empleando en la actualidad como Ensayo estándar para evaluar el efecto de algunos modificadores del asfalto en la resistencia al envejecimiento.

2. DEFINICIÓN

2.1. El fenómeno de envejecimiento¹⁴

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es un proceso complejo el cual ocurre durante el mezclado de la planta, la construcción de la carretera y la vida de servicio. En el mundo es ampliamente aceptado que el mecanismo de funcionamiento del envejecimiento ocurre en dos etapas a saber: el envejecimiento a corto y a largo plazo. La primera etapa del fenómeno se debe a la pérdida de componentes volátiles mientras la mezcla está caliente y la segunda se produce por las condiciones ambientales y los efectos del clima que generan una oxidación progresiva durante el tiempo de servicio.

Aunque el método de diseño de la mezcla asfáltica permite establecer sus cantidades volumétricas, así como se conocen las propiedades de cada material por separado, no se puede afirmar que solamente el envejecimiento del asfalto o de los agregados predice el envejecimiento de la mezcla. Es así que investigadores que han estudiado los efectos del envejecimiento sobre asfaltos convencionales y asfaltos modificados han establecido que la temperatura, la radiación ultravioleta, la presión, la humedad genera procesos de oxidación que producen envejecimiento en los materiales.

En contraste, otros estudios concluyen que los cambios en las propiedades reológicas, físicas y químicas dependen directamente de los materiales que componen la mezcla, las condiciones de exposición a las

¹⁴ <http://es.scribd.com/doc/112503071/Envejecimiento-de-asfaltos-y-mezclas-asfalticas#scribd>. consulta 10 de julio del 2017.

condiciones ambientales y el tiempo. Así mismo, otros investigadores explican que el espesor de la película de asfalto en la mezcla y que el contenido de vacíos tiene también alguna influencia.

En consecuencia, para estudiar el envejecimiento se requiere, de un lado, el análisis de variables de la mezcla, sus componentes, el asfalto, los agregados, los vacíos con aire y el espesor de la película de asfalto y, de otro lado, se deben estudiar las variables extrínsecas que producen el efecto del envejecimiento como la temperatura, la presión atmosférica, el agua de lluvia, la humedad relativa del ambiente, la radiación ultravioleta, el viento, las cargas del tránsito y el tiempo de servicio.

Como resultado de la interacción de las variables mencionadas, la mezcla asfáltica experimenta cambios de orden físico, mecánico, químico y reológico.

Respecto a los cambios físicos, resultados de laboratorio han mostrado que al envejecer el asfalto disminuye la penetración y la ductilidad y aumenta la temperatura del punto de ablandamiento y del punto de ignición. Adicionalmente, desde el punto de vista mecánico y dinámico, se observa un incremento en la relación de los módulos antes y después del envejecimiento, corresponde a un incremento en el módulo, es decir el endurecimiento del material, el ahuellamiento se reduce como la vida de fatiga y se incrementa el agrietamiento.

De igual manera, los cambios químicos que se experimentan corresponden a un reacomodo de las moléculas de asfalto por efecto de la volatilización y la oxidación que producen cambios en los grupos de saturados, asfáltenos, resinas y aromáticos. Además, se evidencia la formación de grupos

funcionales carbonilos y sulfoxidos en las mezclas con asfalto envejecidos. Así mismo, durante la oxidación, la respuesta elástica del asfalto se incrementa más rápidamente que la respuesta viscosa, debido al incremento en el tamaño de las moléculas por la presencia de oxígeno.

Tal parece que las aglomeraciones moleculares pierden movilidad para fluir, el ángulo de fase decrece y se incrementa la viscosidad, lo que corresponde a cambios manifiestos en las propiedades reológicas.

2.1.1. Definición de envejecimiento

De acuerdo con las consideraciones previas, se pueden establecer que el envejecimiento en las mezclas asfálticas es un fenómeno producido por la interacción de variables intrínsecas y extrínsecas, las cuales producen un efecto de endurecimiento en la mezcla. Los términos endurecimiento por la edad (*AgeHardening*) o envejecimiento (*Aging*) son regularmente usados para describir el fenómeno de endurecimiento¹⁵.

El endurecimiento se produce por tres mecanismos a saber: la volatilización de componentes del asfalto mientras está caliente en la planta, la prolongada oxidación por la acción de las variables ambientales durante la vida de servicio y el endurecimiento esterítico del asfalto producido por los cambios de temperatura cercana a la temperatura ambiente.

Es necesario considerar que los mecanismos de volatilización y oxidación, son de carácter químico y por lo tanto, irreversibles pues alteran la

¹⁵ BELL, Ch. A., *Aging of Asphalt-Aggregate Systems. SHRP A-305. Strategic Highway Research Program.*, National Research Council, Washington, D.C. 1989.

composición química del asfalto, mientras que el endurecimiento esterítico corresponde a una reacomodamiento estructural el cual se puede revertir mediante la exposición al calor o al trabajo mecánico.

Como resultado de estos mecanismos, el envejecimiento produce un endurecimiento global del material el cual incrementa la probabilidad de agrietamiento de las mezclas asfálticas iniciando en la superficie de la capa expuesta a las condiciones ambientales.

2.1.2. Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento

2.1.2.1. Variables Intrínsecas

Las variables intrínsecas corresponden a las características propias de la mezcla asfáltica, es decir lo materiales y las características de fabricación. Entre ellas se encuentran el asfalto y los agregados, referidos a los materiales y el contenido de vacíos con aire y la permeabilidad como características propias de la fabricación de la mezcla.

2.1.2.1.1. Asfalto

Muchas y diferentes definiciones se tienen para explicar el asfalto, en general es un material producto derivado del petróleo con una gran cantidad de componentes hidrocarburos. Los asfaltos son constituidos por la fracción más pesada obtenida de la destilación al vacío del crudo reducido (fondos de la destilación atmosférica del petróleo). Normalmente son hidrocarburos pesados, solubles de color oscuro, y pueden ser líquidos o sólidos (Ecopetrol, 2011). El

asfalto es un material con comportamiento viscoso o visco-elástico dependiendo de la temperatura en la que se encuentre.

A temperaturas bajas se comporta como un material sólido (elástico) y a medida que la temperatura se incrementa presenta comportamiento fluido (visco). En Europa es comúnmente llamado bitumen y en América el término utilizado para su descripción es cemento asfáltico, ligante asfáltico o asfalto.

2.1.2.1.2. La película de asfalto

La película de asfalto en un pavimento es del orden de 15 a 20 micrones¹⁶ y el espesor mínimo recomendado es del orden de 6 a 9 micrones. Sin embargo no hay suficiente evidencia en la literatura que soporte esa recomendación. Es de anotar que el espesor de la película de asfalto no es constante en toda la mezcla, los agregados finos pueden tener una capa de mayor espesor que los agregados gruesos, por lo que generalmente se considera un espesor promedio.

En general, un adecuado espesor de la película alrededor de los agregados asegura una razonable durabilidad a la mezcla asfáltica. Esta película es la que realmente experimenta la acción del envejecimiento y en consecuencia es la que se endurece, por esta razón los Ensayos de laboratorio para simular el envejecimiento se realizan sobre muestras de película delgada de asfalto del orden de uno a tres milímetros de espesor.

¹⁶ PETERSEN, J., C., *A thin-Rim Accelerated Aging Test for Evaluating Asphalt Oxidative Aging.*, *Proceeding*, Association of Asphalt Paving Technologists, Preprint Volume, 1989.

Los cambios de temperatura producidos por el clima y el tránsito hacen que a medida que pasa el tiempo el asfalto se oxide y presente comportamiento quebradizo con la consecuente aparición de grietas.

El espesor de la película de asfalto sobre los agregados y la cantidad de vacíos en la mezcla inciden directamente en el endurecimiento - envejecimiento de las mezclas asfálticas.

2.1.2.1.3. Los agregados

Realmente es escasa la evidencia científica sobre la incidencia de los agregados en el fenómeno de envejecimiento, de hecho se considera que los agregados son materiales inertes o áridos que no son objeto de reacciones químicas que alteren su composición al ser mezclados con otros materiales. Sin embargo, se ha podido comprobar que la presencia del agua en la mezcla en servicio cambia el PH de los agregados y en consecuencia se reduce la adhesión y por tanto desprendimiento de la película de asfalto, fenómeno conocido como *Stripping*.

El envejecimiento de la mezcla se da por el intercambio de oxígeno entre el agua y el asfalto y la pérdida de cohesión se da por el cambio de PH de los agregados.

Es probable que algunos agregados, particularmente agregados silíceos, tiendan a formar las mezclas susceptibles al daño por humedad sin importar el tipo de asfalto con el que se combinen. Algunos asfaltos puros o no modificados tienden a formar mezclas resistentes al agua con todos los agregados, incluso con los algunos de baja calidad; pero algunos asfaltos tenderán a separarse incluso con agregados buenos. La resistencia al daño del

agua parece no relacionarse con la cantidad original de moléculas orgánicas polares en asfaltos puros.

Durante el envejecimiento oxidativo de los asfaltos, se generan las moléculas polares que pueden mejorar resistencia al daño del agua. Los compuestos de similar estructura pueden demostrar ser agentes eficaces de la *anti - stripping*.

Adicionalmente los agregados con agua se cargan de manera negativa en diferentes proporciones. Los asfaltos en presencia de agua producen las moléculas ácidas del asfalto. Se separan en dos iones, al anión carboxilo y el protón de hidrogeno, causando una polaridad negativa en la superficie del asfalto. La interacción de uno de los procesos trae como resultado una fuerza repulsiva que al desarrollarse separa el sistema agregado asfalto. La diferencia de los agregados radica en la cantidad de la mezcla asfáltica producida, siempre y cuando se cumplan las condiciones para la producción de la mezcla.

Esas condiciones se refieren a la gradación y limpieza de los agregados, las características de absorción del asfalto en el momento de la mezcla, así como la temperatura previa a la mezcla, la ausencia de humedad y el espesor de la película de asfalto que los envuelve.

Algunos autores expresan que más importante que los agregados es el espesor de la película de asfalto que los envuelve y por esta razón los agregados, no generan influencia alguna en el envejecimiento de las mezclas asfálticas, además la mineralogía de los agregados no incide en el desempeño de la mezcla, quizás el elemento que tiene mayor influencia en el envejecimiento es el contenido de llenante mineral o *filler*.

El llenante mineral es un material fino que pasa la malla No. 200 que unido al asfalto confirman un sistema denominado mastic o mástico. La incorporación del llenante mineral genera cambios en la propiedades del medio continuo bituminoso, hace del asfalto una capa más gruesa con condiciones diferentes de fluidez, mejora la adherencia y provee un mayor espesor que recubre los agregados, lo que ayuda a retardar el envejecimiento. Diferentes estudios han mostrado los beneficios que ofrece el *filler* para reducir los efectos del envejecimiento, los materiales comúnmente usados son el calcio carbonatado, la cal hidratada, el cemento portland o arenas finas.

El tratamiento con llenantes minerales en diferentes cantidades genera pequeñas reducciones en la penetración, pequeños incrementos en la temperatura del punto de ablandamiento y pequeños incrementos en la viscosidad, indicadores que dejan ver que el envejecimiento es menor. De la misma forma algunos filleres tienen impactos significativos en la reducción del agrietamiento de las mezclas y en el mejoramiento del comportamiento visco elástico¹⁷.

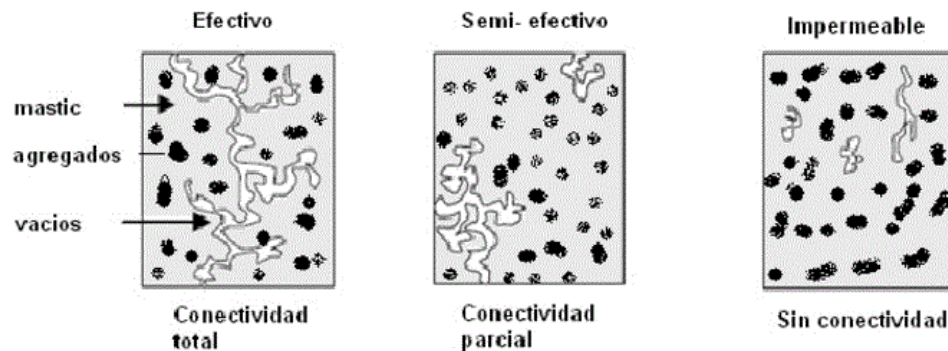
2.1.2.1.4. El contenido de vacíos con aire.

El tamaño y la distribución de los vacíos con aire en las mezclas asfálticas dependen de las propiedades de los agregados, el diseño de la mezcla y el proceso de compactación. (Chen et al., 2004) clasificaron el contenido de aire en las mezclas en tres categorías: el contenido de vacíos efectivo, semi efectivo e impermeable, la consideración de efectividad se interpreta como la conectividad de los vacíos dentro de la mezcla, lo que

¹⁷ PLANCHER, H., GREEN, E. L., PETERSON, J. C., *Reduction of Oxidative Hardening of Asphalt by Treatment with Hydrated Ume-A Mechanistic Study., Proceeding, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 45, 1976, p.1-24.

permite un acomodamiento de la mezcla en los cambios térmicos por efecto del clima y el tránsito, pero además la circulación del agua y aire dentro de la misma.

Figura 1. **Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas**



Fuente: Adaptado de CHEN. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 7.

La función de los vacíos en la mezcla es la de generar unos espacios de estabilización de la mezcla en sí, ya que en el momento de incrementarse la temperatura por efecto del clima o por el tránsito vehicular, el asfalto tiene a fluir y puede ocupar esos espacios. De hecho, debe existir un equilibrio en la cantidad y distribución de los vacíos, pues el exceso de ellos genera deformaciones plásticas y se permite el paso de agua y vapor; por el contrario contenidos de vacíos muy bajos producen además deformaciones plásticas, problemas de exudación.

En general, el contenido de vacíos es una variable importante que afecta el desempeño, la deformación permanente y la fatiga de una mezcla asfáltica. El flujo de aire y agua a través de los vacíos permite la oxidación de los asfaltos, lo que se traduce en el envejecimiento de la mezcla asfáltica. Entre mayor sea la percolación de aire y agua en la capa de rodadura, mayor será la oxidación del asfalto. El concreto asfáltico con alto contenido de vacíos

experimenta un incremento significativo en el módulo de resiliencia, en la viscosidad y en grupos carbonilos.

En contraste, mezclas con contenidos de vacíos bajos experimentan un leve incremento en el módulo, pero sus valores son cercanos al inicial. Estudios sobre asfaltos han demostrado que entre mayor sea el contenido de vacíos en las mezclas, los asfaltos recuperados de las mismas, experimentan una reducción significativa en la penetración, lo que indica un endurecimiento de la mezcla en el tiempo de servicio. Mezclas con vacíos reducidos, donde la circulación de aire es baja, reducen la velocidad de endurecimiento de la película de asfalto sobre los agregados.

2.1.2.2. Variables extrínsecas

2.1.2.2.1. Temperatura

La temperatura es sin duda el primer agente externo al cual es sometida la mezcla asfáltica para su elaboración, el asfalto es elevado a temperaturas entre 150 y 170 grados centígrados, ambiente en el cual ocurre la volatilización del asfalto y en consecuencia ocurre alguna pérdida de masa, adicionalmente ocurre la polimerización de algunas moléculas pequeñas. La volatilización del asfalto inicia a los 150 °C y la cantidad de volátiles se puede incrementar al doble cada 10 o 12 °C adicionales, este proceso ocurre por la evaporación de los componentes aromáticos del asfalto y en todos los casos la volatilización está acompañada de reacciones de oxidación lo que influye directamente en el incremento de la rigidez.

La temperatura es una variable a controlar cuidadosamente en los procesos de transporte del asfalto, producción y colocación de la mezcla, ya que de exceder los valores mencionados se producirá un envejecimiento prematuro del asfalto, lo que reduce la vida de servicio de la mezcla asfáltica. Encontraron que el manejo del asfalto a temperaturas cercanas a 143°C induce menor envejecimiento que a temperaturas cercanas a 185°C.

Entonces, durante la vida de servicio la mezcla asfáltica está expuesta a dos temperaturas, la primera en el proceso de mezclado, almacenamiento y construcción, proceso que se denomina envejecimiento de corto plazo y, la segunda, durante la vida de servicio en el que ocurre el envejecimiento de largo plazo.

2.1.2.2.2. La humedad

La humedad es uno de los factores que afecta en mayor grado el desempeño de la mezcla asfáltica debido a que produce una degradación en las propiedades mecánicas del material por la presencia de agua en forma líquida o como vapor. La degradación de las propiedades mecánicas se da por la pérdida de adhesividad entre el asfalto y el agregado y la pérdida de resistencia cohesiva en el cemento asfáltico por la presencia de agua. Para que esto ocurra es necesario que exista algún elemento que permita el ingreso de agua o vapor dentro de la mezcla y esta situación es atribuible a una deficiente superficie de rodadura y a problemas de drenaje.

El *Stripping* es asociado a cinco diferentes mecanismos de funcionamiento, los cuales operan de manera individual o algunas veces de manera conjunta.

Los mecanismos asociados al *stripping* son: el desprendimiento asociado por el rompimiento de los vínculos generados por la polaridad de los materiales y el agua, el desplazamiento por efecto de la penetración del agua en el agregado a causa del rompimiento de la película de asfalto, la formación de emulsiones espontáneas donde el asfalto representa la fase continua y el agua la fase discontinua, la presión de poros excesiva en mezclas asfálticas con alto contenido de vacíos producida por el tráfico el cual induce presiones sobre el agua contenida en los poros y, por último, el bombeo de agua producido por las llantas de los vehículos sobre las mezclas asfálticas saturadas.

El problema del daño por humedad conocido como "*stripping*", es un problema que está regido por el transporte de agua en medios porosos y la integración con los materiales que componen la mezcla asfáltica.

Los efectos derivados del *stripping* corresponden a una reducción en la cohesión de la carpeta asfáltica y la pérdida de adhesión entre la carpeta de asfalto y la superficie del agregado. En consecuencia, este daño afecta el desempeño del pavimento asfáltico con respecto a su módulo dinámico y la resistencia a la tensión. Según inspecciones de campo se ha encontrado que el *stripping* comienza en el fondo de la capa y trabaja hacia arriba atacando sobre todo el agregado grueso.

En comparación con el envejecimiento el *stripping* genera daños respecto de la cohesión y adhesividad del asfalto en la mezcla evolucionando de manera vertical de abajo hacia arriba mientras que el envejecimiento produce el endurecimiento de la carpeta asfáltica por efecto de los mecanismos mencionados y su evolución se produce desde la superficie hacia abajo.

El *stripping* es considerado como un daño funcional del pavimento, mientras que el envejecimiento se considera como un daño superficial pero que a la postre contribuye en el deterioro del pavimento ya que al producirse el endurecimiento y fragilidad de la película de afluato, se forma agrietamiento que permite el ingreso del agua al interior de la capa de pavimento.

2.1.2.2.3. Radiación UV

La luz solar está conformada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia que están agrupadas dentro de un cierto rango, llamado espectro luminoso. Las ondas de baja frecuencia del espectro solar (infrarrojo) proporcionan calor y las de alta frecuencia (ultravioleta) hacen posible el proceso de fotosíntesis o el bronceado de la piel. Los datos disponibles acerca de la distribución de la radiación solar fuera de la atmósfera indican que la luz en forma de radiación electromagnética tiene una longitud de onda entre 0,2 y 0,3 μm .

Del total del espectro del 7% que se recibe es radiación ultravioleta entre 0,2 y 0,4 μm , el 42% corresponde al área visible entre 0,4 y 0,8 μm y el 51% restante corresponde al área infrarroja entre 0,8 y 3 μm .

La densidad de potencia de la radiación solar es la energía por unidad de área, incide en una superficie ortogonal a los rayos del sol. De acuerdo con mediciones realizadas por la NASA, la constante solar tiene una medida anual equivalente a 1353 W/m^2 y experimenta oscilaciones de más o menos tres por ciento durante el año debido a los movimientos propios de la tierra. De esta manera, fuera de la atmósfera la radiación obtenida por la banda ultravioleta es de 95 W/m^2 , sin embargo al pasar la atmósfera, la radiación es atenuada por

dispersión y la absorción de las partículas del aire y esa magnitud depende de la concentración de vapor de agua, ozono y polvo.

La reducción por estos efectos puede alcanzar hasta un 10%, principalmente en casos de polución alta o polvo, pero la reducción de la capa de ozono del 1% puede llegar a incrementar la radiación hasta en un 4%.

El espectro ultravioleta está dividido en tres sub rangos denominados UV A (315 - 400 nm). UV B (280 - 315 nm) y UV C (240 - 280 nm). La importancia relativa de cada uno radica en la intensidad y la longitud de onda, algunos estudios han establecido que la radiación producida por unos tiene efectos más destructivos que los otros. La radiación UV B es quizás la responsable de producir las mayores variaciones en la estructura de los materiales que los daños comparados con la UV A o la UV C.

Los efectos de la radiación ultravioleta en el cemento asfáltico pueden cambiar la estructura molecular del mismo, así como pueden acelerar los procesos de envejecimiento térmico o alterar la susceptibilidad al agua de las mezclas. Esta situación puede presentarse ya que tres mecanismos de envejecimiento se pueden dar simultáneamente: volatilización, oxidación y polimerización.

Cuando la radiación alcanza el material, diferentes moléculas pueden experimentar una gran cantidad de niveles de energía, así en algunos casos la degradación molecular puede ocurrir, las cadenas de carbono-carbono se pueden romper y se pueden combinar con el aire (oxidación), adicionalmente la degradación puede llevar a la pérdida de materiales livianos (volatilización). Como resultado de la degradación puede presentarse además la formación de

radicales libres y esto puede estimular la combinación y formación de nuevas moléculas (polimerización).

La consecuencia de estos procesos corresponde al endurecimiento superficial de la capa de rodadura, la fragilidad de la misma y la aparición de grietas. Similares resultados fueron encontrados al realizar pruebas de foto degradación con xenón.

2.1.2.2.4. Tiempo de exposición

El tiempo de exposición es quizás la variable que los investigadores han intentado predecir en las diferentes pruebas y Ensayos de laboratorio. La búsqueda de la duración del tipo de la prueba que sea equivalente al proceso de envejecimiento de corto plazo y la duración de la prueba que sea equivalente al envejecimiento de largo plazo.

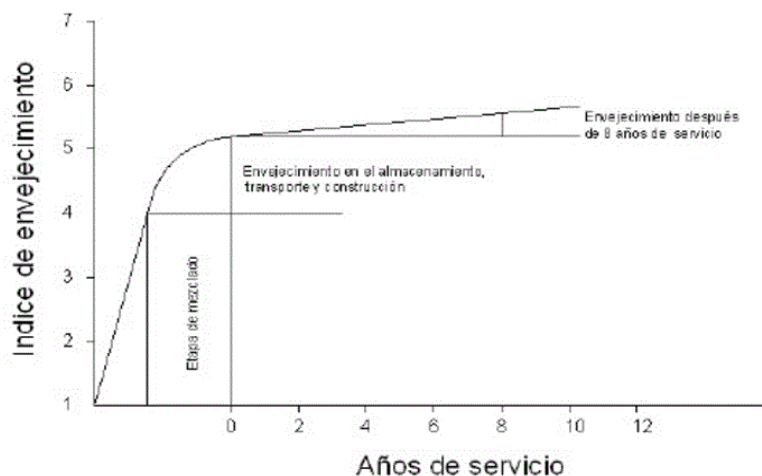
El proyecto SHRP (*Strategic Highway Research Program* 1987 - 1993), al establecer el grado de desempeño de los asfaltos determinó que el efecto que produce RTFOT durante 85 minutos y a 163 grados centígrados, equivale al envejecimiento de corto plazo y que el residuo del proceso anterior sometido en un vaso a presión PAV durante 20 horas a 100 grados centígrados y 2,07 Mpa de presión, equivale al envejecimiento de largo plazo aproximadamente 8 años de servicio de la superficie de rodadura.

Sin embargo, estas aproximaciones están dadas para algunos de los cementos asfálticos utilizados en los Estados Unidos, pero es evidente que para otras localidades y otros tipos de materiales esa equivalencia no es del todo correcta.

De todas maneras es aceptado a nivel mundial que el envejecimiento sucede en dos etapas, la primera el envejecimiento a corto plazo que ocurre en el momento de la mezcla, el transporte y la construcción. Esta etapa se caracteriza porque la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida, el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas. La segunda etapa corresponde al envejecimiento de largo plazo asociado exclusivamente a la vida de servicio del pavimento.

Allí las moléculas superficiales del pavimento reaccionan con las condiciones ambientales y se presentan procesos de oxidación; en contraste con la primera etapa, este proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años. Los efectos del envejecimiento a largo plazo son el incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica. La figura 3 muestra de manera esquemática las fases del envejecimiento.

Figura 2. **Etapas en el proceso de envejecimiento (Read&Whiteoak, 2003)**



Fuente:READ & WHITEOAK.*Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 10.

2.2. Pruebas de envejecimiento Acelerado

Diferentes estudios se ha realizado con el fin de simular procesos de envejecimiento acelerado utilizando varios tipos de hornos y cámaras sometiendo el asfalto y/o la mezclas asfálticas a diferentes temperaturas, oxidación por presión con oxígeno o aire, radiación de diferentes tipos. A continuación se describen las diferentes pruebas a las que los investigadores han sometido los materiales para determinar el envejecimiento.

2.2.1 Envejecimiento de cementos asfálticos

Diversos estudios se han realizado con el fin de correlacionar el envejecimiento producido en el laboratorio mediante la utilización de diferentes equipos, con el envejecimiento real ocurrido en campo. La hipótesis general es que el envejecimiento / endurecimiento que ocurre en la mezcla, se debe en su totalidad a las alteraciones que experimenta el asfalto por condiciones de temperatura, humedad, radiación ultravioleta y las cargas del tránsito.

En el método de diseño Superpave®, se utiliza como norma el envejecimiento de corto plazo de los cementos asfálticos la prueba RTFOT (Prueba de horno de película delgada en movimiento, por sus siglas en inglés) y la prueba PAV (Vaso de envejecimiento a presión, por sus siglas en inglés) como envejecimiento de largo plazo.

Estas dos pruebas son aceptadas alrededor del mundo como las pruebas que mejor predicen el comportamiento de los ligantes asfálticos en el tiempo, sin embargo como las condiciones climáticas son particulares en cada sitio y los ligantes tiene igualmente características particulares es necesario establecer la equivalencia en años con respecto al desempeño del material en la vía.

Tabla II. **Métodos de envejecimiento acelerado de cementos asfálticos.**

Autor (año)	Prueba o Ensayo	Temperatura °C	Duración	Peso de Muestra en gr.	Espesor de Lamina	Otras Características
Lewis & Welborn (1940)	Horno de película delgada TFOT	163	5 h	50	3,2 mm	
Edler, et al., 1985	TFOT Modificado	163	24 h		100 µm	
Hweem, et al., (1963)	Horno rotatorio de película delgada RTFOT	163	75 min.	35	1,25 mm	Flujo de aire 4 000 ml/min.
Edler, et al., 1985	Horno rotatorio de película delgada extendido ERTFOT	163	8 h	35	1,25	Flujo de aire 4 000 ml/min.
Parmeggiani, 2 000	Horno rotatorio de película delgada con nitrógeno NRTFOT	165	75 min.	35	1,25	Flujo de N2 4 000 ml/min.
DIN (1988)	Prueba de frasco giratorio	165	150 min.	100	-	Frasco giratorio 20 rpm
Griffin, et al., (1985)	Prueba de micro película de Shell	107	2 h		5 µm	
Hveem, et al., (1963)	Prueba modificada de micropelícula de Shell	99	24 h		20 µm	
Traxler (1961), Halstead & Zenewitz (1961)	Prueba modificada de micropelícula de Shell	107	2 h		15 µm	
Schmidt & Santucci (1969)	Prueba rotatoria de micropelícula RMFOT	99	24 h	0,5	20 µm	Solvente Benzeno
Schmidt (1973)	RMFOT modificada	99	48 h	0,5	20 µm	Orificio abierto de 1,04 mm de diámetro
Kemp & Prodoehl (1981)	Prueba de durabilidad de horno inclinado TDOT	113	168 h	35	1,25 mm	
Mc Hattie (1983)	TODT alternativo	115	100 h	35	1,25 mm	
Petersen (1989)	Prueba de envejecimiento acelerado de película delgada	130 o 113	24 o 72 h	4	160 µm	Orificio abierto de 3 mm de diámetro
Bahia, et al., (1985)	Prueba modificada Horno rotatorio de	163	75 min	35	1,25 mm	Barras de acero

	película delgada RTFOT					
Lee (1973)	Prueba de durabilidad de Iowa (IDT)	65	1 000 h	Residuo TFOT - 50	3,2 mm	2,07 Mpa, oxígeno puro
Edler, et al., (1985)	Bomba de oxidación a presión (POB)	65	96 h	Residuo ERTFOT - 500	30 µm	2,07 Mpa, oxígeno puro
Verhassellet& Croquet (1991)	Prueba de envejecimiento acelerado de película delgada (RCAT), con cilindro rotatorio	70 - 110	144 h		2 mm	4 - 5 l/h de oxígeno puro
Christensen& Anderson (1992)	Vaso de envejecimiento a presión PAV	90 - 110	20 h	Residuo RTFOT/TFOT - 50	3,2 mm	2,07 Mpa, aire
Hayton et al., (1999)	Prueba de envejecimiento de alta presión (HiPAT)	85	65 h	Residuo RTFOT - 50	3,2 mm	2,07 Mpa, aire
Qi& Wang (2002)	Envejecimiento por absorción eoxígeno (OAA)	50	125 h		1 mm	0,133 Mpa (O ₂) en la oscuridad

Fuente: Elaboración propia con base en AIREY, *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 12.

Las pruebas en general consisten en someter películas delgadas de asfaltos de diferentes espesores a diferentes tiempos de exposición al calor en condiciones de movimiento o estáticas, a diferentes temperaturas y con suministro de oxígeno o aire a presión. El efecto de estas pruebas se puede considerar en dos sentidos, el primero la simulación del envejecimiento ocurrido en la producción de la mezcla o envejecimiento de corto plazo y el segundo el envejecimiento ocurrido en la mezcla en servicio o de largo plazo.

2.2.2. Pruebas de envejecimiento acelerado en mezclas asfálticas

Diferentes estudios se han realizado con el fin de simular procesos de envejecimiento acelerado utilizando varios tipos de hornos y cámaras,

sometiendo la mezcla asfáltica y en algunos casos probando los materiales que la componen por separado.

2.2.2.1. Tratamiento de calor extendido en laboratorio

Los trabajos realizados para evaluar el envejecimiento de mezclas asfálticas son menores en cantidad comparados con los trabajos en cementos asfálticos. Desde 1903 se realizaron investigaciones de mezclas de arenas finas con asfaltos sometidas a tratamientos de calor extendido¹⁸. Una vez realizado el tratamiento se evaluaron los efectos en la penetración de los asfaltos recuperados antes y después del envejecimiento.

Trabajos posteriores utilizaron el mismo procedimiento de evaluación de los asfaltos recuperados de las mezclas, comparando propiedades antes y después de los tratamientos de envejecimiento¹⁹.

Los tratamientos en general consistieron en exponer las muestras a periodos de calor extendido en hornos los cuales generalmente se realizaban sobre muestras compactadas. Hacia 1988 se expusieron a similares tratamientos muestras de mezclas asfálticas sueltas con el fin de simular condiciones de envejeciendo en planta.

La tabla III Resume algunos procedimientos utilizados para envejecer mezclas asfálticas, en la tabla se observa que los tratamientos que simulan el envejecimiento de corto plazo se lleva a la temperatura de mezclado de 135 °C o más con duraciones en horas y utilizando mezclas sueltas.

¹⁸ DOW, A. W., *Asphalt Experiments at Washington*. Engineering Record, Vol. 47, No. 18, 1903.

¹⁹ HUBBARD, P., GOLLUMB, H., *The Hardening of Asphalt with Relation to Development of Cracks in Asphalt Pavements.*, *Proceeding*, Association of Asphalt Paving technologists Vol. 9, 1937, p. 165.194.

En contraste, los que simulan el envejecimiento de largo plazo se realizan a temperaturas bajas de 107 °C o menos, con duraciones en días y mezclas compactadas. Lo que no se ha podido establecer en estos estudios es, en primer lugar, la duración adecuada o la duración de la prueba que simule o que produzca los mismos efectos del mezclado en planta y el transporte al sitio de construcción en el caso del envejecimiento de corto plazo y, en el segundo lugar, la relación entre la temperatura del horno en la prueba y la temperatura de funcionamiento de la mezcla en la vía.

Tabla III. **Métodos utilizados para evaluar el envejecimiento por temperatura de las mezclas asfálticas.**

Autor (año)	Prueba o Ensayo	Temperatura °C	Duración	Muestra	Otras características
Von Quintas (1988)	Envejecimiento de planta	135	8,16,24,36 h	Material suelto	
SHRP (1991)	<i>Short term aging test</i> STOA	135	4 h	Material suelto	
Scholz (1995)	Bitutest Protocol	135	2 h	Material suelto	
Pauls&Welborn (1952)	Mezcla arena Otawa + asfalto	163	Varios periodos	50 x 50 mm ²	
Plancher et al. (1976)		150	5 h	25 x 40 mm ² Φ	
Kemp&Prodoehl (1981)	Otawasand mixtures	60	1 200 h		
Hugo y Kennedy (1985)		100	4 o 7 días		80% humedad relativa
Bell, et al., (1991)	<i>Short term aging test</i> STA	135 y 163	0, 6 y 15 h	Material suelto	Compactación amasado 250 y 500 psi
Bell, et al., (1991)	<i>Extended mixing</i> EM	135 y 163	0, 10, 120 y 360 min.	Material suelto	Horno giratorio y compactación por amasado
Von Quintas (1988)	<i>Long Term</i> aging	60	2 días	Muestra compactada	Pre-acondicionamiento
Bell, et al., (1991)	<i>Long Term</i> aging LTA	107	3 días	Muestra compacta	Pre-acondicionamiento

				da	nto
		40 y 60	2 días	Muestra compactada	
		107	0, 2 y 7 días	Muestra compactada	
SHRP (1991)	<i>Long Term oven ageing LTOA</i>	85	5 días	Muestra compactada	
Scholz (1995)	<i>Long Term oven ageing LTOA</i>	85	120 h	Muestra compactada	
Scholz (1995)	<i>Bitutest Protocol</i>	85	5 días	Muestra compactada	

Fuente: elaboración propia con base en AIREY, G. D., *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 14.

A manera de síntesis se puede afirmar que aún no se encuentra un tratamiento normalizado en laboratorio que prediga los efectos de envejecimiento de mezclas asfálticas en el tiempo. Es evidente que encontrar las duraciones adecuadas de las pruebas depende directamente de las condiciones climáticas del lugar y de las características propias de las mezclas asfálticas.

2.2.2.2. Tratamiento de oxidación

La reacción del asfalto con el oxígeno de la atmósfera es quizá el factor principal que produce el endurecimiento y lleva a la fragilidad del mismo, el endurecimiento es un resultado de la polaridad del oxígeno contenido en las fracciones del asfalto el cual aumenta la consistencia del asfalto por el incremento de las fuerzas de interacción molecular. Adicionalmente, las moléculas pueden desarrollar envejecimiento químico irreversible el cual

generalmente parece ser la suma de las reacciones con el oxígeno y de la polimerización de la oxidación y la evaporación de los componentes volátiles.

Igual que los tratamientos de calor extendido, algunos investigadores han realizado pruebas de laboratorio para producir envejecimiento acelerado en las mezclas asfálticas mediante inyección de oxígeno y aire a las mezclas (tabla VI).

Tabla IV. **Métodos para evaluar el envejecimiento por oxidación en mezclas asfálticas.**

Autor (año)	Prueba o Ensayo	Temperatura °C	Duración	Muestra	Otras Características
Kumar y Goetz (1977)	<i>Mixture oxidation</i>	60	1, 2, 4, 6, 10 días	Muestra compactada	Aire a 0,5 mm de agua
Von Quintas (1988)	<i>Long Termageing</i>	60	5 y 10 días	Muestra compactada	Aire a 0,7 Mpa
Kim et al. (1986)	<i>Oregon mixtures</i>	60	0, 1, 2, 3, 5 días	Muestra compactada	Aire a 0,7 Mpa
SHRP (1991)	<i>Lowpressureoxidation LPO</i>	60 o 85	5 días	Muestra compactada de STOA	Oxígeno a 1,91/min.
Bell et al. (1991)	<i>PressuerOxidation</i>	25	2 días	Muestra compactada	Oxígeno a 100 psi
	<i>Vessel</i>	60	7 días	Muestra compactada	Oxígeno a 300 psi
Khalid& Walsh (2000)		60	Más de 25 días	Muestra compactada	
Korsgaard (1996)	<i>PAV mixtures</i>	100	72 h	Muestra compactada	Aire a 2,07 Mpa.

Fuente: elaboración propia con base en AIREY, G: D., *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, pág. 15.

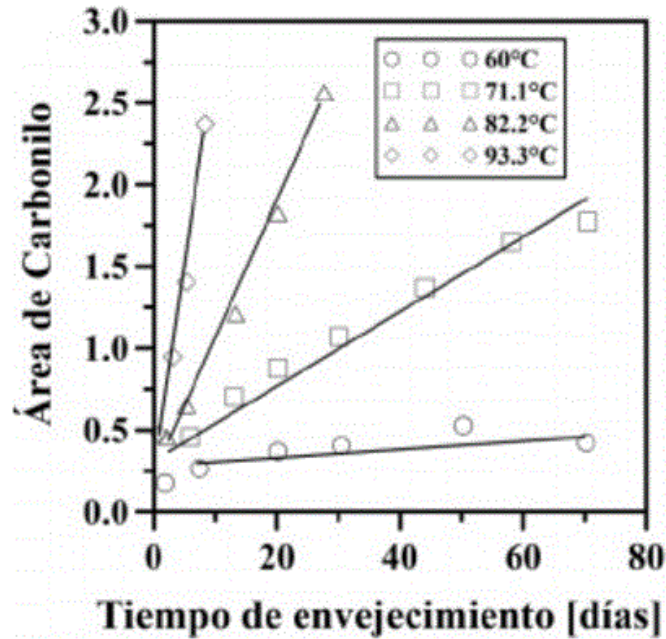
Para el análisis de la oxidación, se realiza un análisis químico del asfalto recuperado de las mezclas asfálticas envejecidas, el asfalto es extraído mediante el uso de solventes, centrifugado y roto evaporación. Los solventes utilizados comúnmente son el tetra-cloruro de carbono, el tricloroetileno, el tolueno, el varsol o la gasolina blanca; sin embargo, se ha podido establecer que los solventes generan en el asfalto extraído alteraciones que no han sido del todo determinadas, estudios realizados, explican que los solventes producen un envejecimiento del asfalto en el momento de ser separado de los agregados, que no se ha determinado.

Como este proceso se realiza en ausencia de oxígeno, es posible que el endurecimiento por oxidación no exista, entonces para contrarrestar de alguna manera su acción debe realizarse el procedimiento de extracción en frío y evaluar las propiedades del asfalto en el menor tiempo posible después de la extracción.

La absorción de oxígeno produce la formación de nuevos grupos funcionales como sulfoxidos, anhídridos, ácidos carboxílicos y cetonas. Desde hace varios años se estableció que la oxidación en los asfaltos es representada con buena precisión por la aparición del grupo carbonilo que se observa a través de la medición de la absorbancia o reflectancia en una prueba de cromatografía de infrarrojo.

La figura 3, muestra la evidencia del crecimiento del área de carbonilo en un asfalto tipo AC - 20 a diferentes temperaturas y tiempos de envejecimiento.

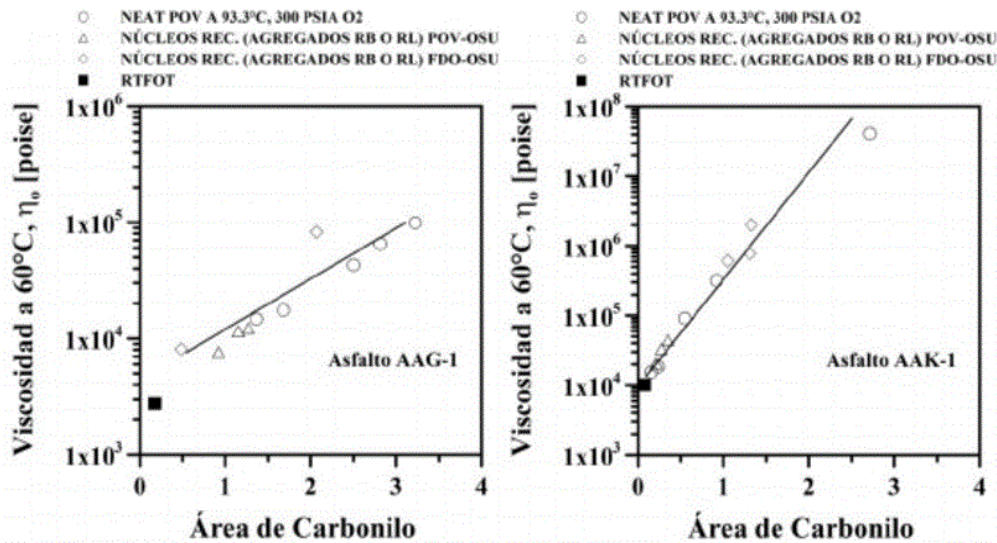
Figura 3. Crecimiento de la banda infrarroja de Carbonilo a diferentes temperaturas en un asfalto AC - 20.



Fuente: LAU., *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 15.

Diferentes asfaltos presentan diferentes velocidades de reacción a la misma temperatura y muestran diferentes energías de activación, como resultado un asfalto puede envejecer más rápido a una temperatura que otro, mientras que este puede envejecer más despacio a otra temperatura, este cruce en la data de envejecimiento es de un gran significado en el diseño de pruebas para el envejecimiento de carreteras, figura 4. La pendiente de esta relación corresponde a la susceptibilidad al endurecimiento del asfalto.

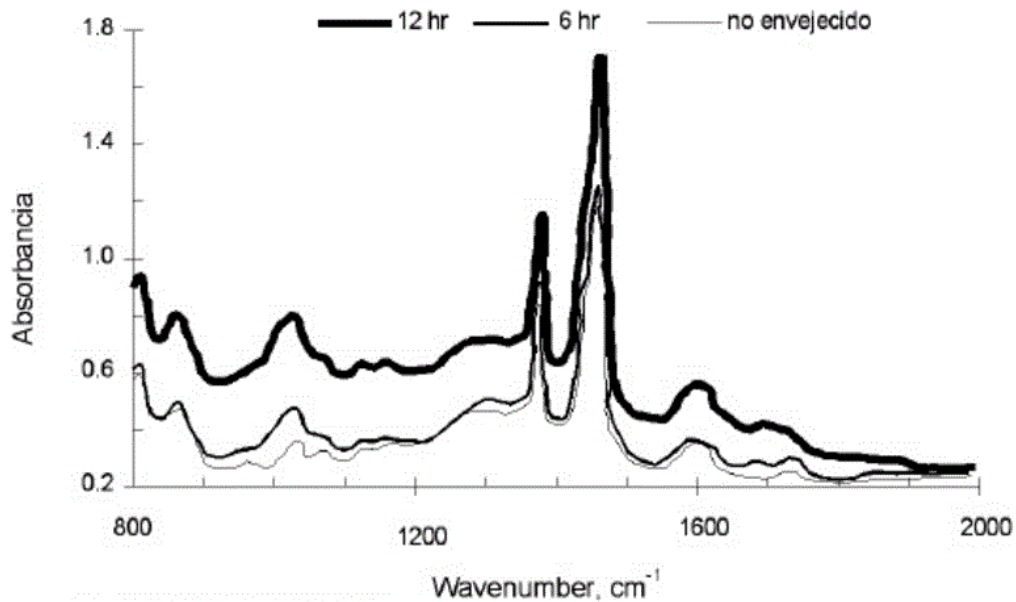
Figura 4. **Susceptibilidad al endurecimiento en mezclas asfálticas con dos asfaltos diferentes, dos agregados diferentes y tratamientos diferentes.**



Fuente: LAU., *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*. p. 16.

Otros estudios se realizaron para modelar el envejecimiento de los asfaltos recuperados de mezclas, basado en la oxidación. Sometieron a espectroscopía de infrarrojo (FTIR) para medir la cantidad de luz transmitida que se absorbió sobre una longitud de onda nominal de $4\ 000$ a 400 cm^{-1} , en la figura 5 se observa que a medida que progresa el tiempo de oxidación se incrementa la absorción que se produce por el crecimiento de grupos funcionales sulfóxidos en el asfalto.

Figura 5. **Espectro infrarrojo banda sulfoxidos. Temperatura 60 °C, 12 horas de exposición, asfalto 60/70.**



Fuente: CHEN y HUANG. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 16.

Las muestras antes y después del envejecimiento se han sometido a Ensayos de separación de componentes del asfalto, es decir cantidades de saturados, aromáticos, resinas y saturados. Al observar los resultados, el contenido de los compuestos saturados, aromáticos y resinas de los asfaltos envejecidos disminuyen, mientras que el contenido de asfáltenos aumenta. Los compuestos aromáticos se convierten en parte en resinas, así que el contenido de los compuestos aromáticos disminuye en consecuencia y finalmente las resinas cambian a asfáltenos.

Tabla V. **Cambios en la composición de los grupos químicos de tres asfaltos después de envejecimiento por absorción de oxígeno (OAA).**

Muestras	SJS (%)			SHL (%)			REQ (%)		
	Original	Envejecido	Diferencia	Original	Envejecido	Diferencia	Original	Envejecido	Diferencia
Saturados	19,13	18,54	-0,59	17,18	15,04	-2,14	14,68	13,3	-1,34
Aromáticos	26,28	23,89	-2,39	32,49	26,64	-5,85	27,67	22,08	-5,59
Resinas	38,53	34,99	-3,54	31,88	28,78	-3,1	45,28	40,02	-5,26
Asfáltenos	16,06	22,58	6,52	18,45	29,54	11,09	12,37	24,6	12,23

Fuente: Elaboración propia con base en QI & WANG. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 17.

2.2.2.3. Tratamiento de fotodegradación

En relación con la degradación a causa de la luz, algunos investigadores estudiaron los cambios en el comportamiento de los asfaltos y de las mezclas asfálticas, como se puede observar en la tabla VI. En estos Ensayos se intenta reproducir el efecto que produce la luz del día o la radiación producida por el sol.

Tabla VI. **Métodos para evaluar el envejecimiento por efectos de luz y radiación en mezclas asfálticas.**

Autor (año)	Prueba o Ensayo	Temperatura °C	Duración	Muestra	Otras Características
Traxler (1963)	Foto oxidación	87,7	18 h	Asfalto 3 µm	Mazda Sum Lamp (175 Watt)
Hveem (1963)	Radiación Infra roja	60	1 000 h	Mezcla con arena 5 a 7 µm	Corriente de aire a 41 °C
Kemp y Predochl (1981)	Foto degradación luz actínica	35	18 h	Asfalto 3 µm	1 000 MW/cm ²
Hugo y Kennedy (1985)	Foto oxidación		54 h	Mezclas asfálticas	Mezcla de laboratorio y de campo. Mazda Sum Lamp (175 Watt)
Hugo y Kennedy (1985)	Wetherómetro		14 d (336 h)	Mezclas asfálticas	
Tia, et al., (1988)	Calor y radiación UV	60	1, 7, 28 y 90 días	Mezclas asfálticas	
Montepara, et al., (2000)	Cámara de radiación		450 días		Lámparas de gas de mercurio de 125 W (PHILIPS HPK)
Martínez y Caiccco (2005)	Wetherómetro		504 h	Asfaltos y mezclas asfálticas	Radiación ultravioleta tipo B
Reyes y Camacho (2008)	Wetherómetro		1 350 h	Mezclas asfálticas	Rayos UV de 11,2 W, irradiancia 3 700 µW/m ²
Mo, et al., (2010)	Cámara ultra violeta	40	1 000 h	Concreto asfáltico poroso	Luz ultra violeta UV (60 w/m ² , 300 - 400 wavelength)

Fuente: Elaboración propia con base en AIREY, *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 17.

La consecuencia más importante de envejecimiento acelerado por acción de la luz o la radiación ultravioleta, corresponde a un incremento significativo en la viscosidad del material, con respecto a los cambios químicos se puede evidenciar la formación de enlaces carbonilos que cambian la estructura del

asfalto y que estimulan el proceso de polimerización, así mismo se encontró que el módulo complejo se incrementó y descendió el Ángulo de fase.

Con respecto a los cambios mecánicos, se observó un incremento en la estabilidad Marshall en las mezclas, lo que produjo un incremento en la rigidez, el flujo en cambio descendió con la exposición al igual que la deformación permanente, lo que produce estructuras con mayor susceptibilidad a la rotura frágil. Con respecto al módulo resiliente se encontró un incremento considerable, hasta de un 50% después de la exposición a la radiación ultravioleta.

Es evidente que el efecto se produce en la superficie de rodadura pero también afecta una profundidad significativa de la mezcla y la profundidad de daño depende del tiempo de exposición, por ejemplo para 18 horas de exposición se encontró una profundidad de daño de 5 micrones mientras que una exposición de 504 horas el daño alcanzó valores hasta de 15 mm.

Aunque estos estudios han considerado los efectos y las profundidades, no se sabe con certeza la equivalencia en años de servicio con respecto a los periodos de exposición, estas equivalencias de igual manera que los tratamientos abordados anteriormente, dependen de los materiales y las condiciones climáticas de la zona explicados, estudios realizados por Hveem, concluyeron que 1 000 horas de foto degradación equivalen a 5 años en la vía para mezclas asfálticas con arena de Ottawa.

2.2.2.4. Tratamiento a exposición a la caña de azúcar

La modificación del asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito.

Desde hace mucho se emplea caucho como modificador, ya sea natural o sintético, con tasas no superiores al 5%. Actualmente existen los polímeros sintéticos y naturales.

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por lo tanto, disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Como modificadores existen los elastómeros, también conocidos como polímeros tipo 1, es un tipo de polímero con propiedades visco-elásticas, es decir que pueden recuperar su posición original al sufrir esfuerzos de tensión. Se caracterizan por ser un modificador de asfalto que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas, tanto altas como a bajas temperaturas, incrementando la temperatura de desempeño.

Los elastómeros se utilizan como modificadores de mezcla asfáltica para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales (recapeos).

Dentro de este grupo se puede mencionar, a los polímeros naturales, como el caucho, la celulosa, la glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son algunos ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales.

La caña de azúcar es una planta proveniente del sur-este asiático y Nueva Guinea. La expansión musulmana supuso la introducción de la planta en territorios donde hasta entonces no se cultivaba. Así llegó al continente europeo, más en concreto a la zona costera entre las ciudades de Málaga y Motril, siendo esta franja la única zona de Europa donde arraigó.

Posteriormente los españoles llevaron la planta, primero a las islas Canarias y luego a América. Se dice que la primera que se llevó a América fue por Pedro de Atienza, en el segundo viaje de Colón a la Isla Española. Así, este cultivo se desarrolló en países como El Salvador, Cuba, Guatemala, Honduras, Brasil, México, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, República Dominicana, Colombia y Venezuela, que se encuentran entre los mayores productores de azúcar del mundo.

Se denomina Azúcar, en el uso más extendido de la palabra, a la sacarosa, también llamada azúcar común o azúcar de mesa.

La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la

remolacha. El 27% de la producción total mundial se realiza a partir de la remolacha y el 73% a partir de la caña de azúcar.

Se Funde a los 160°C y calentada a 210°C se transforma en una masa de color pardo denominada caramelo, utilizada en la elaboración de dulces y pasteles, así como para la saborización y coloración de líquidos.

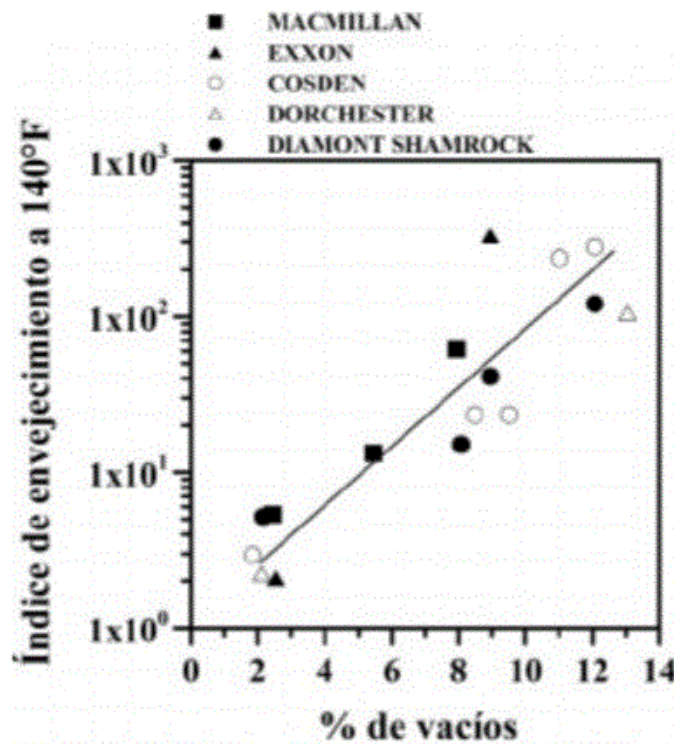
2.2.2.5. Evaluación del envejecimiento en condiciones de campo

Algunos investigadores han evaluado el desempeño de los pavimentos asfálticos en campo con el fin de establecer correlaciones y modelos con respecto al comportamiento encontrado en el laboratorio después de someter las mezclas asfálticas a los diferentes tratamientos mencionados. En general, el procedimiento adoptado consiste en extraer núcleos de vías en servicio y de ellos extraer alguna porción del asfalto contenido, con el fin de evaluar las propiedades físicas, químicas, mecánicas, dinámicas y reológicas. Estos estudios se realizan bajo la hipótesis que el envejecimiento de la mezcla se atribuye en mayor proporción al envejecimiento que sufre el asfalto en la vida de servicio y en menor proporción a los agregados que componen la mezcla.

En una investigación realizada por Martin, donde se tomaron núcleos de pavimentos en servicio de diferentes vías en los Estados Unidos (EEUU), se analizaron parámetros como viscosidad, porcentaje de vacíos, área de carbonilo y sulfóxido mediante cromatografía de columna de gel, índice de envejecimiento a 140 °C y 275 °F en la que concluyeron sobre la importancia de los vacíos en la mezcla, figura 6. Afirmaron que el contenido de vacíos con aire es uno, sino el más importante factor que afecta a la mezcla la velocidad de envejecimiento en los pavimentos asfálticos. De acuerdo con ellos la influencia

de esta variable parece ser tan marcada que opaca el desempeño del tipo de asfalto, el agregado, la densidad del tráfico y los diferentes microclimáticas.

Figura 6. Índice de envejecimiento a 140 °C con diferentes porcentajes de vacíos.



Fuente: MARTIN. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 19.

Rondón y Reyes evaluaron el cambio que experimenta el módulo resiliente, la deformación permanente y la resistencia última bajo carga monótonica de una mezcla asfáltica densa en caliente cuando es expuesta al ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia). Las mezclas se fabricaron utilizando diferentes cementos asfálticos, y se evaluó su evolución en el tiempo, evaluado los parámetros mencionados cada 3 meses en un tiempo de

observación de 20 meses. De los estudios se concluye que el comportamiento que experimentan las mezclas depende del tipo de asfalto utilizado.

Adicionalmente, la tendencia de las mezclas con los tres tipos de CA es experimentar un aumento de los valores de rigidez con el tiempo de exposición al ambiente debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento de los ligantes asfálticos.

2.3. Métodos de envejecimiento: modelos que predicen el envejecimiento de un pavimento flexible.

El estudio de modelos que interpreten el endurecimiento por envejecimiento de ligantes y de las mezclas asfálticas, ha sido tema de investigación desde hace más de cinco décadas. El entendimiento y la simulación en laboratorio de este fenómeno, sería el inicio de la fabricación de mezclas asfálticas de alta durabilidad.

Por lo anterior, muchas de las investigaciones en el área de pavimentos giran en torno a cómo modelar o simular las condiciones ambientales, y condiciones de carga a las que se ve afectado un pavimento durante su vida útil. Es así como se ha logrado realizar grandes avances en el área del envejecimiento de mezclas asfálticas.

Cabe destacar el estudio realizado por el SHRP (Programa Estratégico de Investigación de carreteras) desarrollado en los Estados Unidos entre 1987 y 1993, este programa dio como resultado el sistema SUPERPAVE® (*Superior Performance Pavements*), programa que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en

caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos.

A pesar del gran avance que existe hoy en día en el área de simulación de envejecimiento en laboratorios de ligantes y mezclas asfálticas, estas técnicas no consideran todos los factores que influyen en el envejecimiento en campo de las mezclas (humedad, temperatura ambiente, régimen de precipitaciones, régimen de radiación solar).

Se sabe que el envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfaltos creando moléculas más grandes y polares. Tales cambios moleculares alteran las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas, tales como el Módulo (G^*) y el ángulo de fase (δ). Para evaluar el efecto del envejecimiento es necesario medir las propiedades visco-elásticas de muestras envejecidas y muestras originales. El efecto general del envejecimiento es un incremento del módulo y una disminución del ángulo de fase.

Un elemento fundamental para comprender y predecir el desempeño a largo plazo de mezclas asfálticas es conocer la evolución de su envejecimiento por oxidación y el consecuente impacto en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla. Analizar cómo los asfaltos sufren durante el tiempo de mezclado y servicio este proceso de oxidación, debido a factores como temperatura, presión y tiempo. Adicionalmente, ver cómo afecta el envejecimiento por oxidación en particular para cada asfalto mediante Ensayos de caracterización. Algunos asfaltos envejecen más rápido y se endurecen más que otros.

Este hecho resulta en la necesidad de caracterizar la resistencia de los asfaltos a la oxidación, para luego tener en cuenta esta resistencia a la hora de

seleccionar asfaltos para pavimentos y predecir su comportamiento en el largo plazo.

2.3.1. Modelo de Donke (1997)

Donke, Liu, Davison, Bullin&Glover proponen un modelo numérico para explicar la oxidación de una mezcla asfáltica tomando como referencia parámetros tales como la presión, temperatura, tiempo y composición química. El modelo numérico en cuestión consta básicamente de 3 ecuaciones:

- Tasa de formación de carbonilos

Está definida por la ecuación:

$$r_{CA} = AP^a e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

Por medio de esta expresión se puede determinar la velocidad de formación del grupo carbonilo (r_{CA}), que básicamente es lo que evidencia el proceso de oxidación, donde:

A = Constante de Arrhenius o factor de frecuencia, que representa la velocidad de colisión entre las moléculas de asfalto y el oxígeno. Esta constante depende de la composición química específica del asfalto. Un alto valor de colisión entre partículas provoca una mayor formación del grupo carbonilo, ocasionando un envejecimiento prematuro por oxidación.

E = Energía de activación de la reacción. Varía, al igual que la constante de Arrhenius, de acuerdo a la composición química específica del asfalto.

R = Constante universal de los gases.

T = Temperatura absoluta de envejecimiento.

α = Orden de reacción.

P = Presión.

- Cantidad de Carbonilos.

$$CA = CA_0 + r_{CA}t$$

Esta expresión representa la cantidad de grupos carbonilo presentes en una mezcla asfáltica, donde:

CA = Cantidad de grupos carbonilo.

CA_0 = Cantidad de grupos carbonilo para $t = 0$.

r_{CA} = Velocidad de formación de grupos carbonilo.

t = Tiempo.

- Viscosidad

$$\eta = me^{[(CA+AP^\alpha e^{(-E/RT)t)}]HS}$$

Esta expresión relacionada el cambio en las propiedades físicas de una mezcla asfáltica, tales como la viscosidad con la formación del grupo carbonilo. El cambio en la viscosidad está influenciado por condiciones tales como la temperatura, el tiempo y la presión a la que se encuentra la mezcla.

Algunos términos de esta expresión son:

m = Viscosidad inicial de la mezcla.

HS = Coeficiente de susceptibilidad de la mezcla.

Es la pendiente de la Gráfica $\ln G^*Vs$.

El coeficiente de susceptibilidades un valor característico para cada tipo de asfalto, sin embargo, puede presentar variaciones bajo diferentes condiciones de presión. Entre más alto es HS el asfalto es más propenso a endurecerse prematuramente.

- Parámetros A, E, α y HS.

Como se ha analizado en los numerales anteriores los parámetros A, E, α y HS debe partir de una comparación de las propiedades físicas y químicas de mezclas a diferentes edades de servicio, las mezclas envejecidas aceleradamente en el laboratorio bajo diversas condiciones de tiempo, presión, temperatura y finalmente mezclas originales, sin envejecer.

2.3.2. Determinación de energía de activación en cementos asfálticos

El flujo viscoso en cualquier líquido puede considerarse como un proceso que requiere de un cierto nivel de energía térmica en el cual las moléculas tienen que sobrepasar una barrera de energía para desplazarse a un sitio adyacente. Al incrementarse la temperatura, también se incrementa la energía térmica de las moléculas, así como los sitios vacantes o "huecos" en el líquido. En 1936, Henry Eyring, describió este modelo de la barrera de energía de activación de flujo.

Cuando fluye un líquido, son las capas de moléculas líquidas que resbalan una sobre otra para sobreponerse a las fuerzas intermoleculares que causan resistencia al flujo. Fue mediante este modelo que Eyring afirmó que es

posible modelar la relación entre viscosidad y temperatura utilizando la ecuación de Arrhenius:

$$\eta = Ae^{\frac{E_f}{RT}}$$

Donde η es la viscosidad del fluido, T es la temperatura en grados Kelvin, A es el factor constante, E_f es la energía de activación de flujo, y R es la constante universal de gas [$8,314 J \cdot mol^{-1} K^{-1}$]. Es de mayor utilidad expresar la ecuación de la siguiente manera:

$$\ln \eta = \frac{E_f}{RT} + \ln A$$

Gráficando $\ln \eta$ en relación con $1/T$, rinde los valores de la pendiente de E_f/R . El concepto de energía de activación fue aplicado recientemente al estudio de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas. Maze midió la energía de activación en ligantes modificados con EVA y sin modificación con viscosimetría rotacional. La energía de activación promedio obtenido para el ligante modificado con EVA fue de 67 KJ/mol. La energía de activación medida por Pellinen, de mezclas sin modificación fue de 205 KJ/mol y la de mezclas modificadas fue de 202 KJ/mol.

En ese estudio, se utilizó la viscosimetría rotacional para determinar la energía de activación de flujo de ligantes asfálticos modificados y sin modificación, provenientes de diferentes crudos, utilizando un viscosímetro rotacional Brookfield. La dependencia de la viscosidad en función de la temperatura se permite obtener la energía de activación de flujo (ecuación de Arrhenius). La energía de activación de flujo determina de esta manera que se

usó para catalogar la susceptibilidad de los ligantes a la temperatura y mostrar el grado de envejecimiento de estos.

Entre los factores que afecta la energía de activación, tenemos:

- Tipo de Asfalto
- Envejecimiento
- Tipo de polímero
- Influencia del contenido de polímero

2.3.3. Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL)

El método universal de caracterización de ligantes (UCL) fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miro Recasens. Basado en la aplicación del Ensayo de Cántabro, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo estas propiedades varían con la temperatura, la acción del agua y del envejecimiento.

Es una metodología de fácil ejecución y que ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos betunes que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación, pues permite diferenciar el comportamiento de ligantes, incluso aquellos que poseen propiedades similares según la caracterización tradicional y, además manifestar las diferencias entre diversos betunes-polímeros entre sí, y entre estos y los convencionales.

Se dio a este procedimiento el nombre de universal por ser aplicable a cualquier betún. El principio del mismo es comparar directamente las repuestas

de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las características del proceso en cada caso. Se evalúan cuatro propiedades funcionales que se les reconoce a los ligantes y que afectan al comportamiento de las mezclas bituminosas: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento.

Se fabrica una mezcla patrón abierto, sin fíller ni fino, con unos áridos patrón. La granulometría está constituida por áridos con tamaños comprendidos entre los tamices N°4 y N°30. Se elaboran probetas Marshall siguiendo el criterio de equiviscosidad de los ligantes para la sección de la temperatura del moldeo.

Las probetas se someten a diferentes condiciones (en seco, tras inmersión, a distintas temperaturas y periodos de envejecimiento) y son ensayadas al Cántabro (NLT - 352 y NLT - 362). El Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste consiste en someter una probeta Marshall a un efecto abrasivo mediante el uso del tambor de la máquina de los Ángeles, sin la carga abrasiva que se emplea para el Ensayo de Desgaste de áridos, haciendo girar 300 vueltas y determinándose la pérdida porcentual de masa de la probeta.

La cohesión se valora determinando las Pérdidas en el Ensayo Cántabro, en seco y a 25°C. La susceptibilidad térmica se analiza variando la temperatura de las probetas que son sometidas al Ensayo Cántabro y determinando las Curvas de Estado o variación de las pérdidas con la temperatura; para ello, previo al Ensayo, se les mantiene 6 horas a la temperatura con la cual ingresará al tambor de Los Ángeles (el cual se mantiene siempre a 25°C). La disminución de la resistencia a la disgregación en el Ensayo Cántabro a 25°C, tras mantener las probetas sumergidas en agua (un día a 60°C) es una medida de la pérdida de adhesividad.

Para evaluar el envejecimiento, el método asume que el ligante forma una película fina sobre el árido, al utilizar probetas con altos contenidos de vacíos, las cuales se someten a distintos periodos de estufa a elevada temperatura y con ventilación forzada y que posteriormente se ensayan siguiendo el procedimiento estipulado por el EnsayoCántabro.

El método también propone un criterio de clasificación de ligantes por grado según el cual, para probetas sometidas al método UCL con un 28% de vacíos, se define la temperatura de fragilidad como aquella en la que se alcanza una pérdida del 60% a bajas temperaturas y a temperatura de inconsistencia como la correspondiente al 70% de pérdidas a elevadas temperaturas.

Una variante interesante en considerar conjuntamente la resistencia al envejecimiento y la susceptibilidad térmica, lo cual permite graficar un Haz de Curvas de Estado.

2.3.4. Efecto de la radiación solar y de la temperatura ambiente, en el comportamiento térmico de los pavimentos en el proceso de envejecimiento.

La radiación también conocida como energía radiante, es definida como la energía transferida desde el sol hasta la superficie de un sólido cualquiera. Esta energía viaja en forma de ondas; que liberan energía cuando chocan con un objeto. Esta reacción se debe a que las ondas emitidas por el sol poseen propiedades magnéticas y eléctricas, también conocidas como ondas electromagnéticas.

La radiación solar está definida como la energía radiante emitida por el sol en forma de fotones que viajan a través del espacio en forma de ondas, como lo describe la ecuación siguiente:

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda}$$

Donde E = Energía, h = Constante de Plank, v = Frecuencia, c = Velocidad de la luz, λ = Longitud de onda.

Se define la constante solar I_{sc} como la cantidad de energía solar que incide perpendicularmente por unidad de tiempo sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia del sol igual al promedio de la distancia sol-tierra. De acuerdo con la referencia radiométrica mundial WRR (*WorldRadiometric Reference*) del WRC (*WorldRadiometric Center*).

$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 = 1,96 \text{ cal}/(\text{cm}^2 * \text{min})$, Con una desviación estándar de $1,6 \text{ W/m}^2$.

La radiación solar por fuera de la atmósfera está compuesta por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. Estas longitudes de onda se encuentran acotadas en un rango entre 298 y 300 mm. La radiación solar se encuentra categorizada en tres grandes clases de acuerdo a los rangos de longitud de onda: Ultravioleta (UV), Visible (VIS) e Infrarroja (IR).

La ultravioleta cuenta con longitudes de onda entre 295 y 400 mm. representando un 7% de la magnitud de la constante solar ($95,7 \text{ Watt/m}^2$). Las ondas electromagnéticas emitidas por el sol que se encuentran dentro del rango de 400 a 800 mm. con el 42% se conocen como el rango visible (VIS), y

mayores de 800 mm.hasta 300 mm.con el 51% reciben el nombre de rango infrarrojo (IR).

La cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre se ve afectada por los siguientes factores:

- Capa de ozono
- Hora del día y época del año
- Altitud
- Latitud
- Condiciones climáticas de la región

Por lo tanto, la radiación solar, al interactuar con la atmósfera, ve disminuida su intensidad. Los rayos solares pueden alcanzar la superficie terrestre de dos maneras:

- Directamente
- Difusamente

Se conoce como radiación ultravioleta a toda aquella radiación cuyos componentes se encuentran dentro de una longitud de onda más corta que la radiación visible (VIS)(ASTM, 2004). Como se comentó más arriba, la radiación ultravioleta no es ajena a la atenuación debida a la atmósfera, y al interactuar con la capa de ozono la radiación ultravioleta de tipo C (UVC) es absorbida totalmente por esta capa. De acuerdo con esto, es claro que a la superficie terrestre solo alcanza a llegar las otras dos clases de radiación ultravioleta (UVB y UVA).

Cuando se trata de pruebas de envejecimiento acelerado utilizando radiación ultravioleta artificial es importante conocer algunos términos útiles para realizar comparaciones entre radiación artificial y radiación natural. De acuerdo con Atlas Guide-book. La irradiación en el flujo radiante incide por unidad de área se expresa en $W/m^2/mm.y$ por último la exposición radiante definida como la integral de la irradiación con respecto al tiempo.

El estudio de envejecimiento de asfalto y mezclas asfálticas por efectos de radiación solar y factores climáticos y medio ambientales data desde principios del siglo pasado. Las primeras investigaciones iban enfocadas al desarrollo de métodos y pruebas que relacionan las propiedades del ligante en servicio con pruebas que simularán los efectos de la intemperie en condiciones aceleradas.

De la literatura reportada se pueden hacer las siguientes observaciones. De acuerdo con Vallergera, es claro que la radiación ultravioleta es más dañina que la radiación infrarroja, su trabajo giróentorno a la utilización de películas de 3,125 mm. Traxler²⁰ y Elder²¹, utilizaron películas de asfalto de 3 y 100 micras respectivamente, reconociendo cierto efecto de endurecimiento en las mezclas envejecidas relacionado con el espesor de la lámina. Montepara, reportó procesos de polimerización acompañados de volatilización y oxidación utilizando películas de 1,5 mm. de espesor. Bocci, estableció que la radiación ultravioleta afecta de manera diferente de acuerdo al origen de los asfaltos.

²⁰ TRAXLER, R. N., *Durability of Asphalt Cements., Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 32, 1963, p. 44-58.

²¹ EDLER, A. C., *Use of Aging Test to Determine the Efficacy of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding its Oxidative Hardening., Proceeding, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 54, 1985, p. 118-139.

Finalmente, Afanasieva²², indicó que para los asfaltos colombianos la radiación tipo UVB es la que causa mayor afectación.

Los trabajos reportados presentan en algunos casos grandes diferencias en el espesor de la película de asfalto, sin embargo en toda esa gama de espesores se manifestaron efectos hacia la radiación ultravioleta.

Es de destacar que ninguno de los trabajos ha presentado alguna relación de dependencia o modelo matemático entre las propiedades físicas o mecánicas con respecto al tiempo de exposición. Mucho menos en relación con la temperatura de servicio de los ligantes estudiados.

De los trabajos reportados con mezclas asfálticas se ha demostrado que la radiación ultravioleta sí alcanza a afectar a las mezclas asfálticas. Lo que no se ha establecido aún es la profundidad de afectación de la radiación ultravioleta dentro de la mezcla, esto se puede evidenciar en los trabajos de Tia²³, el cual limita el efecto dentro de los primeros milímetros.

Hugo, F., encuentra efectos de endurecimiento dentro de los primeros 5 mm. y los compara con viscosidades 2 mm. más profundas. Kempt, afirma que la radiación con luz "Actínica" afecta hasta 5 micras de la película de asfalto. Además queda evidenciado que no existe consenso en cuanto a la profundidad de afectación. Sin embargo también es claro que los trabajos reportados han sometido distintas clases de mezclas en estados semi-compactos, y periodos de exposición diferentes.

²² AFANASIEVA, N., ÁLVAREZ, M., ORTÍZ, M. *Rheological Characterization of Aged Asphalt.*, *Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 2, No.3, 2002, p.121-134.

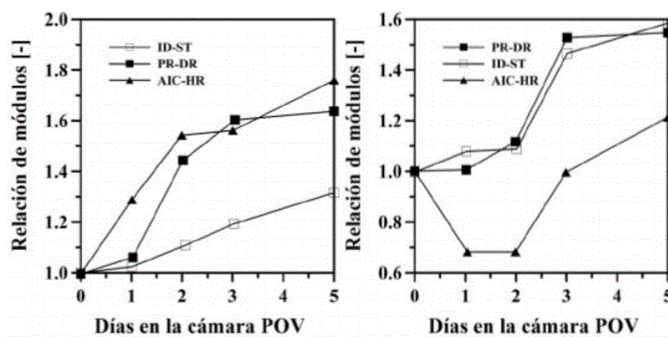
²³ TIA, M., RUTH, B. E., CHARAI, C. T., SHIAU, J. M., RICHARDSON, D., WILLIAMS, J., *Investigation of Original and In-Service Asphalt Properties for the Development of Improved Specifications- Final Phase of Testing and Analysis.*, Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida, Gainesville, FL, 1998.

2.4. Efectos del envejecimiento en el desempeño de las mezclas Asfálticas

2.4.1. Módulos

En los reportes de los investigadores se observa que la relación modular para mezclas asfálticas, antes y después del envejecimiento, presenta un incremento significativo, de hasta 5 veces, dependiendo del volumen de vacíos de la mezcla.

Figura 7. Relación de módulos de envejecimiento para tres mezclas asfálticas, a) al 88% y b) al 94% de compactación.



Fuente:KIM.*Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 20.

2.4.2. Ahuellamiento

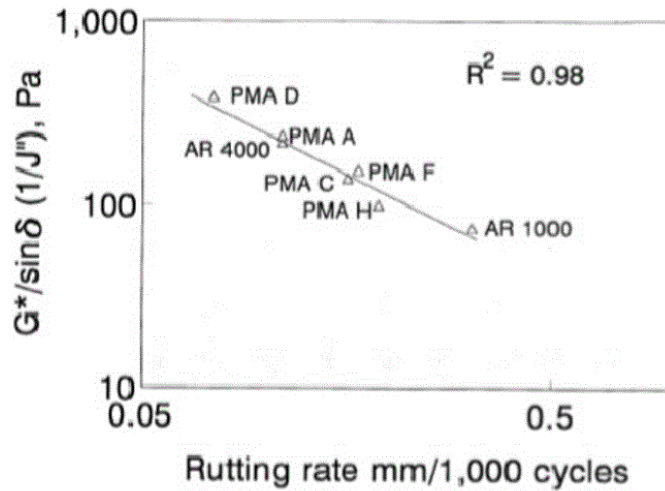
El ahuellamiento (*Rutting*) en la capa superior del pavimento se produce por la acumulación de la deformación plástica en la mezcla como resultado de la repetición de cargas y se considera una falla estructural de los pavimentos asfálticos. Este fenómeno ocurre con mayor severidad a altas temperaturas de

funcionamiento de la mezcla y produce un mayor impacto en los asfaltos sin envejecer que los envejecidos. Por tal razón se hizo necesario relacionar la respuesta elástica del pavimento con las cargas dinámicas del tránsito.

Con respecto al tránsito y a partir de observaciones, se consideró que la aplicación promedio de la carga a través de la llanta de un camión a una velocidad de 80 Km/h corresponde a un tiempo de 0,1 segundos, tiempo en el cual se produce la respuesta visco-elástica del material. Ese valor de 0,1 segundos en una carga de tipo sinusoidal corresponde a 10 rad/s (1,6 Hz). Con respecto al material, los asfaltos envejecidos son más rígidos que los asfaltos naturales, por esta razón el control de ahuellamiento se realiza con asfaltos sometidos a envejecimiento de corto plazo o sea el envejecimiento por producción, transporte, almacenamiento y construcción, proceso que se simula en laboratorio mediante la aplicación de la prueba TFOT o RTFOT.

Para contrarrestar esta falla estructural en la vida temprana del pavimento se consideró que debe realizarse un control en el pavimento que va a ser construido, teniendo en cuenta que el asfalto viene del proceso de envejecimiento de corto plazo, para lo cual el SHRP en la clasificación PG de desempeño de los cementos asfálticos, recomienda tener en cuenta que el parámetro $G^*/\sin \delta$ debe ser mayor que 1 KPa, basado en el criterio de la deformación no recuperable. La escogencia de este valor correspondió a un análisis del comportamiento de diversos cementos asfálticos contra los resultados de wheel-tracking. (figura8.)

Figura 8. **Pérdida de conformidad con respecto al resultado de *Wheel Tracking*.**



Fuente:BOULDIN, *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 21.

2.4.3. Fatiga

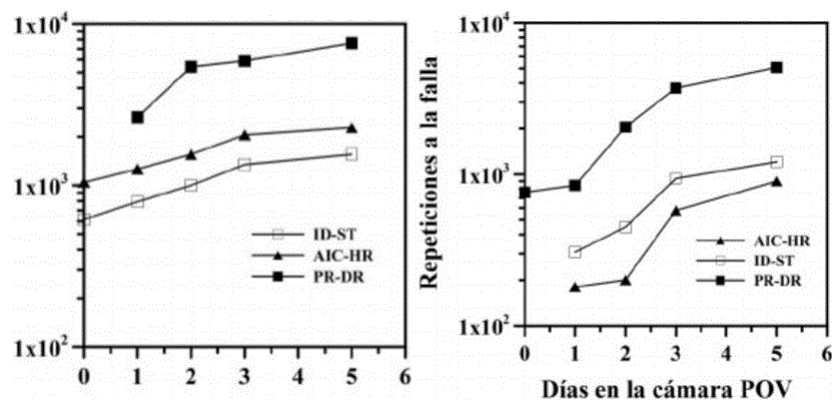
La fatiga es un fenómeno que ocurre en los materiales debido a la acción de cargas repetitivas o ciclos de carga. En tal sentido, la fatiga se asocia con la fractura de los materiales en procesos a largo plazo, en el caso de los cementos asfálticos la fatiga se relaciona con la energía disipada en la carpeta de asfalto durante cada ciclo de carga. El establecimiento de una norma adecuada para la evaluación de la fatiga ha sido una tarea complicada ya que los resultados de laboratorio han sido contradictorios; por un lado, asfaltos rígidos resultan resistentes a la fractura por fatiga en un Ensayo de esfuerzo controlado y por otro lado, asfaltos suaves resultan también resistentes a la fractura por fatiga en un Ensayo de deformación controlada.

El criterio para evaluar el desempeño a la fatiga de un cemento asfáltico es la pérdida de la componente viscosa del módulo complejo $G'' = G \cdot \sin \delta$ a 10

rad/s y a la temperatura de operación, el cual debe ser como máximo mayor a 5 MPa. Es de anotar que dicha evaluación debe realizarse en un material envejecido a largo plazo, por esta razón las pruebas en laboratorio se realizan sobre asfaltos que han pasado por el tratamiento PAV.

Con respecto a los resultados de fatiga en mezclas asfálticas, figura 9 obtenidos por Kim O. K., presentan un incremento constante con el tratamiento en la cámara de presión de oxígeno (POV), las muestras de menor compactación presentaron mayor tiempo de vida a la fatiga. Esos Ensayos se realizaron aplicando esfuerzo de tensión controlado y, por lo tanto, las mezclas más rígidas experimentaron menores niveles de deformación. Una tendencia diferente se podría esperar si se realiza el Ensayo a deformación controlada.

Figura 9. **Vida de fatiga de tres mezclas asfálticas, a) al 88% y b) al 94% de compactación.**



Fuente:KIM, O. K., *Envejecimiento asfáltico y mezclas asfálticas*, p. 22.

La vida de fatiga depende de la estructura de la mezcla asfáltica, es decir, de la película de asfalto, de la granulometría y del contenido de vacíos. En el mismo sentido como se estableció con anterioridad, un mayor espesor de la película de asfalto produce una mayor resistencia al envejecimiento y

también una mejor resistencia a la fatiga, como lo demuestra un estudio llevado, en el cual las mezclas con contenidos de asfalto cerca del 8% obtuvieron un mejor desempeño a fatiga que las mezclas con contenidos de asfalto cercanos a 5%.

2.4.4. Agrietamiento térmico

El incremento de la viscosidad y la reducción de la ductilidad de los asfaltos en las mezclas producen paulatinamente el agrietamiento (*Cracking*) de la superficie de la capa de rodadura. Ensayos de campo realizados por Ruan, Y., establecen que la prolongada oxidación produce estos efectos. El agrietamiento por temperatura puede producirse por dos situaciones, la primera por un descenso puntual de la temperatura que rompe la carpeta de asfalto y la segunda por la fatiga del material debido a la repetición de cargas, esta última condición es denominada fatiga térmica, analizada en la sección anterior. Las dos condiciones mencionadas involucran la propagación de grietas en la carpeta de asfalto.

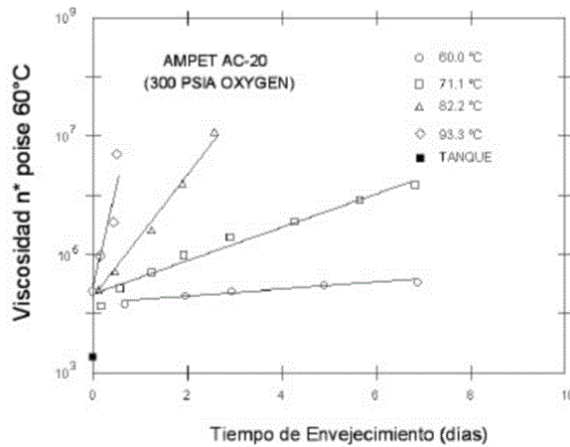
El concepto de temperaturas crítica de agrietamiento que ocurre como resultado de un ciclo de enfriamiento, requiere el concepto de temperatura límite de rigidez. Esto ocurre cuando la carpeta asfáltica alcanza una temperatura en la cual existe un módulo de rigidez crítico producido por una carga que propicia la formación de grietas. En la primera aproximación de la medición de este parámetro se escogió la temperatura a la cual una rigidez de 200 MPa era obtenida en un tiempo de carga de 2 horas. Como el tiempo de respuesta de cada asfalto es particular, fue necesario incluir la curva maestra del mismo, por lo cual se estableció que la pendiente de la curva del creep $m = d \cdot \log(J(T)) / d \cdot \log(t)$.

2.4.5. Viscosidad

Las viscosidades dinámicas se miden a diferentes temperaturas usando un reómetro mecánico dinámico, con el dispositivo de platos paralelos de 25 mm.de diámetro y 1 mm.de altura para disponer la muestra de asfalto (gap).

El Ensayo se realiza a bajas frecuencias de 0,1, 0,01 y 0,005 sec^{-1} dependiendo de la dureza del asfalto, para aproximarse a los valores límites de baja frecuencia y denotados como η_0^* .

Figura 10. **Viscosidad dinámica al endurecimiento con el tiempo de un asfalto AC - 20 a cuatro temperaturas.**



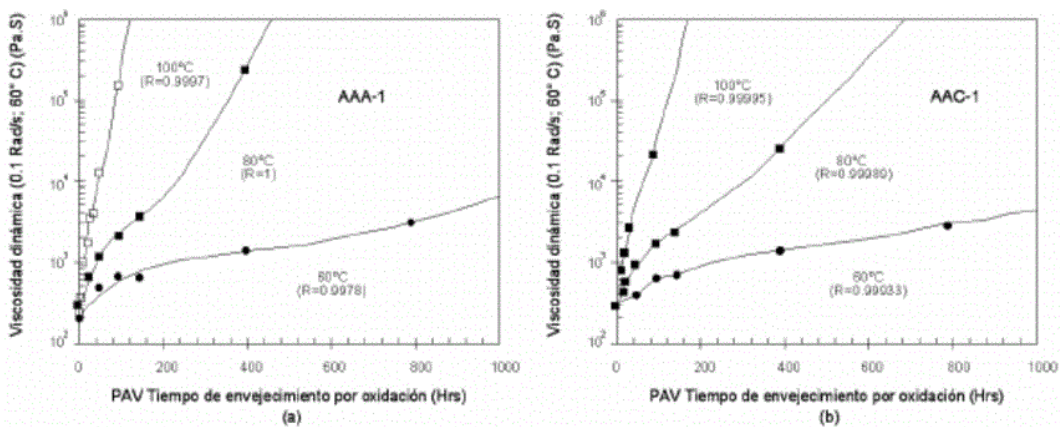
Fuente: LAU, *Envejecimiento asfáltico y mezclas asfálticas*, p. 23

Huh y Robertson realizaron un estudio para determinar los cambios en la viscosidad como medida del progreso del envejecimiento, por efecto de la oxidación del asfalto. Utilizaron el PAV con una presión de 2,07 MPa (300 psi) a temperatura de 60 °C por 800 hrs, 80 °C por 400 hrs y 100 °C por 96 hrs, previo a ello envejecieron muestras de película delgada en el TFO (*Thin Film Oven*), por cinco horas a 163 °C para determinar la pérdida de volátiles

simulando el envejecimiento a corto plazo. Para determinar la viscosidad utilizaron un Reómetro Mecánico (modelo 605 Rheometrics), con el dispositivo de platos paralelos.

La viscosidad dinámica a 0,1 rad/seg y 60 °C fue utilizada como medida del cambio de la viscosidad debido a la oxidación en el PAV a las temperaturas dadas.

Figura 11. **Cambio de la viscosidad debido a la oxidación en PAV, de dos asfaltos diferentes.**



Fuente: HUH y ROBERTSON. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas*, p. 24.

3. DEFINICIÓN DEL EXPERIMENTO

3.1. Mezcla asfáltica

3.1.1. Granulometría y mezcla de agregados

3.1.1.1. Granulometría (ASTM C - 71)

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar los gránulos de que está formado según el tamaño, esta separación se hace una colección de tamices de malla cuadrada

3.1.1.2. Mezcla de agregados

En la fabricación de carpetas asfálticas, es importante emplear áridos de granulometría correcta porque entonces se conseguirá una carpeta de rodadura de buena calidad y una economía de ligante. La calidad del agregado está condicionada al cumplimiento de un conjunto de especificaciones entre las que se encuentra el % de vacíos, el % vacíos rellenados de asfalto, la estabilidad, la fluencia, etc. Y todas están íntimamente relacionadas con la granulometría.

En el análisis de materiales pétreos para bases, subbases, pavimentos asfálticos muchas veces es preciso formar mezclas de dos hasta cinco tipos de materiales pétreos en los siguientes casos:

- Cuando uno o más de los materiales no cumplen especificaciones de granulometría.

- Cuando en un banco o mina de materiales no exista la cantidad suficiente como para abastecer una gran demanda.
- Cuando los materiales son obtenidos por trituración y se requiere formar una granulometría específica.

El procedimiento general consiste en obtener la granulometría de cada uno de los materiales a mezclarse y calcular el porcentaje que se precisa de cada uno para obtener una granulometría deseada.

3.1.2. Diseño de mezcla asfáltica

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

Se han desarrollado algunos métodos de proporciónamiento de asfalto y agregado para una mezcla de hormigón asfáltico en caliente, siendo los más conocidos los siguientes:

- Marshall
- Hveem
- Hurbbard - Field
- Triaxial de Smith

Para el diseño de las briquetas en la presente investigación se utilizará el método Marshall que es el más aplicado.

3.1.2.1. Método Marshall (ASTM D - 1559)

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. El método Marshall, solo se aplica a mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que utilizan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25,0 mm.o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente de penetración.

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas.

Este método consiste en moldear briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente. Estas briquetas dispuestas en serie y cada serie con diferentes porcentajes de asfalto, se las moldea una vez que los materiales (agregados y asfalto) hayan sido aprobados según sus respectivas especificaciones de calidad, tamaño, etc.

3.1.2.2. Preparación de probetas

Las probetas de Ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de Ensayo

está determinado con base en experiencias previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera: El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes precalentados Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación, las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

3.1.2.3. Procedimiento del Ensayo

Expondremos las probetas a diferentes condiciones ambientales que podemos controlar en el laboratorio, durante un tiempo de cinco días, diez días y quince días. Luego de ser expuestas se procederá a realizar el Ensayo de Marshall y el Ensayo de Cántabro según especificaciones (Marshall ASTM D-1559 y el Método de Cántabro NLT - 159/86) .

- Agua a temperatura ambiente: Las probetas fueron sumergidas en su totalidad con agua a temperatura ambiente, simulando una situación en la cual la mezcla asfáltica es expuesta a una saturación máxima, con esto se espera que los vacíos de aire se saturen en su totalidad y de esta forma lograr un envejecimiento y Desgaste prematuro.
- Agua a temperatura de 60 °C: Las probetas fueron sumergidas en su totalidad en agua a temperatura considerada elevada dentro de los parámetros permisibles para las mezclas asfálticas, según especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes (Libro azul), con esto esperamos que los vacíos de aire se saturen en su totalidad, considerando que el agua está a una temperatura considerada elevada, esperamos afectar directamente el bitumen y lograr una mezcla relativamente dúctil.
- Agua a temperatura de 10 °C: Las probetas fueron sumergidas en su totalidad con agua a temperatura considerada baja dentro de los parámetros permisibles para las mezclas asfálticas, según especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes (Libro azul); con esto esperamos que los vacíos de aire se saturen en su totalidad, considerando que el agua está a una temperatura considerada baja, esperamos afectar directamente el bitumen y lograr una mezcla relativamente rígida.
- Congelador a temperatura de -3 °C: Las probetas fueron colocadas en su totalidad en un congelador a una temperatura controlada constantemente extrema baja, fuera de los parámetros permisibles para las mezclas asfálticas, según especificaciones generales para la construcción de

carreteras y puentes (Libro azul); con esto esperamos que la mezcla se torne relativamente rígida debido al congelamiento de la misma.

- Horno a temperatura de 100 °C: Las probetas fueron colocadas en su totalidad en un horno a una temperatura controlada constantemente extrema alta, fuera de los parámetros permisibles para las mezclas asfálticas, según especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes (Libro azul); con esto esperamos que la mezcla se torne relativamente dúctil.
- Agua con Caña, con una relación 1:1: Las probetas fueron sumergidas en su totalidad en una solución de agua con caña (un litro de agua por un litro de jugo de caña), esto para representar el momento en que la mezcla asfáltica es expuesta a la caña de azúcar, y evaluar el grado de envejecimiento y Desgaste al que está expuesta la mezcla asfáltica.
- Agua con carbonato de sodio. Molar 1 (106 grs./litro): Las probetas fueron sumergidas en su totalidad en una solución de agua con carbonato de sodio (Por cada litro de agua agregamos 106 gramos de carbonato de sodio), esto para representar el momento en que la mezcla asfáltica es expuesta a sulfatos y evaluar el grado de envejecimiento y Desgaste al cual están expuesta la mezcla asfáltica.
- Agua con sal (35 grs./litro): Las probetas fueron sumergidas en su totalidad en una solución de agua con sal (por cada litro de agua agregamos 35 gramos de sal), esto para representar el momento en que la mezcla es expuesta al mar y así poder evaluar el grado de envejecimiento y Desgaste al cual esta expuestas las mezclas asfálticas.

Además de la exposición de la mezcla asfáltica en diferentes ambientes siempre en condiciones de laboratorio, existen cuatro procedimientos de Ensayo en el Método de Marshall.

3.1.2.3.1. Determinar la densidad aparente

Esta determinación se realiza tan pronto como las briquetas recién compactadas se han enfriado a la temperatura ambiente; la densidad aparente de las briquetas se determina calculando la relación entre su peso en aire y el peso en agua.

La densidad aparente viene dada por la fórmula:

$$D = \frac{P_a}{P_a - P_{ag}}$$

Donde:

D = Densidad aparente

P_a = Peso de la probeta en el aire en gramos

P_{ag} = Peso de la probeta en el agua en gramos

3.1.2.3.2. Ensayo de estabilidad y flujo

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

La carga de falla se registra como el valor de estabilidad de Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

- Valor de estabilidad de Marshall

Indica la resistencia de una mezcla a la deformación. Existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de Ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

Medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente.

- Valor de fluencia Marshall

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son considerados demasiado frágiles y rígidos para un pavimento de servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son considerados demasiado plásticos y tienen tendencia a deformarse bajo las cargas de tránsito.

Representan la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

- Relación de estabilidad y fluencia

Es la relación que resulta al dividir el valor de estabilidad del valor de flujo, lo cual indica la proporción por centésima de pulgada que se deforma la probeta para la carga aplicada, en otras palabras nos indica la resistencia por centésima de pulgada que tendrá la mezcla asfáltica, debiendo estar este entre 120 y 275.

3.1.2.3.3. Determinación de la densidad máxima teórica

Esta gravedad específica es la masa por unidad de volumen máxima que puede llegar a tener la mezcla asfáltica. Existen dos formas de encontrarla, ya sea por el Ensayo de la Norma ASTM 2041 y AASHTO T 209 donde se indican el procedimiento de Ensayo, el cual es similar a la gravedad específica de los agregados con la diferencia del picnómetro de vacíos que tiene una capacidad de 2000 mililitros y el controlador de presión que se debe ajustar a no más de 30 milímetros de mercurio (4 Kpa), o por la ecuación de densidad máxima teórica de la mezcla.

$$G_{mm} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ asf}}{G_b} + \frac{\% \text{ agr}}{G_{sea}}\right)}$$

Donde:

Gmm = Densidad máxima teórica (rice)

Gb = Gravedad específica del asfalto

Gsea = Gravedad específica efectiva del agregado

%asf = Porcentaje de asfalto en la mezcla

%agr = Porcentaje de agregado en la mezcla

3.1.2.3.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

El contenido de bitumen indica la cantidad de material asfáltico dentro de la muestra y así poder verificar que esta haya sido dosificada de una forma exacta; este Ensayo se lleva a cabo cuando se realiza un control de calidad en la carpeta asfáltica.

La prueba de extracción mide el contenido de asfalto efectivo (bitumen) y proporciona agregado para el análisis granulométrico. Es la revisión final de todas las operaciones individuales que han hecho parte de la producción de la mezcla, y pueden ser de gran ayuda en la evaluación de la calidad de la mezcla.

El proceso se realiza a través de la máquina centrífuga que por medio de rotación y con la ayuda de combustible que sirve de disolvente en la mezcla logra separar el bitumen y extraerlo, quedando únicamente el agregado el cual, después de secarlo completamente, queda libre de cualquier residuo.

Fórmula para calcular el contenido de bitumen

$$\%Bit = \frac{Pn - Ps}{Pn} * 100$$

Donde:

%Bit = Porcentaje de bitumen en la muestra

Pn = Peso neto de la muestra (Generalmente 500g)

Ps = Peso seco en el horno de la muestra

3.2. Ensayo de contenido de asfalto (ASTM D - 2172)

Este Ensayo se realiza mediante una máquina centrífuga para medir el contenido de asfalto de la mezcla, y también comprueba la cantidad del uso de asfalto en la construcción del pavimento.

Para la preparación de la muestra, si la mezcla no es lo suficientemente blanda para separarla con una espátula, se le coloca en una bandeja y se calienta a 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) hasta que pueda manejarse o mezclarse. Se cuartea el material hasta que se obtiene el peso del material requerido para el Ensayo (W1).

Colocar la porción de la muestra de Ensayo en la taza y cubrir con gasolina, dejar el tiempo suficiente para que el disolvente desintegre la porción de Ensayo (no más de 1 hora). Colocar la taza que contiene la porción de Ensayo y el solvente en el aparato de extracción. Secar y determinar el peso del anillo filtrante y ajustar alrededor del borde a la taza. Apretar la tapa firmemente sobre la taza y colocar un vaso graduado bajo el desagüe para recoger el extracto.

Iniciar la centrifugación girando lentamente y aumentar gradualmente la velocidad a un máximo de 3 600 rpm, hasta que deje de fluir el solvente por el desagüe. Dejar que se detenga la máquina y agregar 200 ml. (o más, como sea apropiado para el peso de la muestra) del solvente empleado, y repetir el procedimiento.

Emplear suficiente adiciones de solvente (no menos de tres) de manera que el extracto no sea más oscuro que un color ligero de paja. Recoger el extracto y las levaduras en un recipiente apropiado.

Remover el anillo filtrante de la taza y secar al aire. Si se emplean anillos filtrantes de fieltro, cepillar el material mineral adherido a la superficie y agregar al material extraído. Secar el anillo hasta peso constante en un horno a 100 ± 5 °C (230 ± 9 °F). Verter cuidadosamente todo el contenido de la taza en una cazuela metálica, luego secarla hasta peso constante en un horno a 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).

El peso del agregado extraído (W3) es igual al peso del agregado en la cazuela metálica más el aumento en el peso que experimentan los anillos filtrantes.

Ecuación contenido de asfalto.

$$\%A = \frac{(W1 - W2) - (W4 - W3)}{W1} * 100$$

Donde:

W1 = Peso inicial de la muestra

W2 = Peso final de la muestra

W3 = Peso inicial del filtro

W4 = Peso final del filtro

3.3. Ensayo de recubrimiento y peladura de asfalto en agregados (ASTM D - 3625)

Este Ensayo describe el procedimiento que debe seguirse para valorar, en forma empírica, el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado, mediante un Ensayo de adhesividad pasiva (*stripping*), que intenta poner de manifiesto la afinidad recíproca entre ambos materiales.

También podrá utilizarse para juzgar un agregado con respecto a un tipo de ligante asfáltico o para juzgar un asfalto con respecto a un tipo de agregado. Así mismo, se puede emplear para valorar la acción de los aditivos que se utilicen para mejorar la adhesividad (cubrimiento)

Este Ensayo consiste básicamente en realizar una mezcla con 100 gramos de agregado seco que pasa el tamiz 3/8 de pulgada y retiene el n° 4 con un 5,5% de asfalto, el material asfáltico se mezcla vigorosamente hasta que las partículas de agregado queden totalmente recubiertas, se deja enfriar esta mezcla durante 1 o 2 horas aproximadamente a temperatura ambiente, luego de esto se la coloca en un vaso de vidrio con agua con capacidad de 500 cm³.

Se procede a hervir el agua con la mezcla con un incremento de temperatura de 5 °C por minuto, una vez que hierva el agua dejamos que se mantenga así por 10 minutos.

El resultado de este Ensayo es de caracterización visual, de acuerdo a la cantidad del asfalto desprendido de las partículas de agregado.

3.4. Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 159/86)

El método UCL ha sido desarrollado pensando en la caracterización de los ligantes desde el punto de vista de su utilización en carreteras. No se ha tenido en cuenta su consistencia, su composición, su viscosidad, sino aquellas características que están relacionadas con las propiedades que deben proporcionar el ligante a la mezcla para su adecuado comportamiento en el firme. Es decir, de un ligante bituminoso nos interesa:

- Su poder aglomerante
- Cohesión que proporciona a la mezcla
- Su fluencia / fragilidad
- Susceptibilidad térmica

El comportamiento mecánico de los ligantes bituminosos varía con la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. A temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el ligante puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o tiempos cortos de aplicaciones de carga, el ligante se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad.

- Su durabilidad / adherencia.

La acción del agua produce un efecto de desenvuelta, siendo muy importante conocer la adhesión del ligante al árido en presencia de agua (Adherencia).

- Su durabilidad / envejecimiento.

Por acción del aire, del calor y de los rayos ultravioleta, se va produciendo una oxidación y envejecimiento del ligante, haciéndose este cada vez más duro y frágil.

Para la medida de estas propiedades se ha desarrollado un nuevo procedimiento, basado en la medida de la cohesión proporcionada por el ligante a una mezcla patrón y cómo varía esta con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento del ligante.

- Cohesión / poder aglomerante

La cohesión de un ligante, su poder aglomerante, es lo que permite a las mezclas resistir los esfuerzos del tráfico. Es esta propiedad la que verdaderamente nos interesa en la caracterización de un ligante. Por ello, se ha definido esta propiedad como una característica fundamental del ligante, y se ha valorado a partir de la resistencia a la desintegración que el ligante proporciona a una mezcla patrón, de granulometría y composición definida, mediante el Ensayo de Cántabro a la temperatura de 25 °C.

El Ensayo Cántabro de pérdida por Desgaste consiste en introducir en el molino del Ensayo de Los ángeles una probeta Marshall y someterla al Ensayo de Desgaste sin ningún tipo de carga abrasiva. Durante el Ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta referida, determinándose tras un número de revoluciones, 100, 200 o 300, la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento, al peso inicial:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

siendo:

Pc = Pérdida al Cántabro (%)

Pi, Pf = Peso inicial y final, en gramos

La mezcla patrón se fabrica a partir de unos áridos sanos y limpios, con un Desgaste de los ángeles inferior a 25, y una absorción inferior al 1,5%. Su granulometría es abierta, sin finos ni *filler*, lo que proporciona un alto porcentaje de huecos en mezcla, del $26 \pm 1\%$ facilitando la circulación del aire por la probeta en el Ensayo de oxidación.

Tamices UNE (mm). 5 2,5 0,63

% Pasa 100 80 0

La probeta se fabricará siguiendo el procedimiento Marshall, pero empleando en la compactación únicamente 50 golpes por cara. El peso de los áridos para la elaboración de la probeta es de 1000g. y el porcentaje de betún es de 4.5% sobre áridos.

El Ensayo Cántabro, por ser un Ensayo experimental, no determina ningún parámetro fundamental de la mezcla, como podría ser el ángulo de rozamiento, el módulo, etc., pero sí da una idea clara de la capacidad del ligante para mantener unidos los áridos en la mezcla y como, cuando estas uniones son dúctiles, las pérdidas aumentan. Cada aplicación de carga en el firme o cada vuelta en la máquina de los ángeles da lugar a un proceso de deterioro. Hay una parte de esta energía de deterioro que es absorbida en la deformación elástica del material, otra parte se elimina en su deformación plástica y el resto es la que produce su fisuración o rotura.

Las condiciones de Ensayo de la probeta varían según la variable estudiada: Susceptibilidad térmica, adhesividad o envejecimiento.

- Susceptibilidad térmica.

En el caso de estudiar la susceptibilidad térmica, las probetas se mantienen en el congelador, frigorífico o estufa el tiempo necesario para adquirir la temperatura de Ensayo: 60, 40, 25, 10, -10 y -30°C. El Ensayo se realiza en la máquina de Los Ángeles, que debe encontrarse ubicada en una habitación a 25°C. La duración del Ensayo es de 8 - 9 minutos, por lo que las variaciones de temperatura son pequeñas y similares en cada punto de Ensayo. Se consigue así determinar de forma continua como va cambiando el

comportamiento mecánico del ligante, cuando se comporta frágilmente o de forma inconsistente.

- Adhesividad

El procedimiento desarrollado se basa en determinar el incremento de las pérdidas en el EnsayoCántabro, tras un periodo de inmersión en agua de la probeta. Este periodo es de 24 horas a 60°C o de 4 días a 49 °C.

Es importante señalar que la granulometría de la mezcla patrón es muy abierta, sin finos ni polvo mineral, con lo que el Ensayo evalúa realmente la adherencia del betún a las partículas del árido empelado.

- Envejecimiento.

El envejecimiento del ligante se hace directamente en la mezcla, en película fina, dada la alta porosidad de la granulometría empleada y la ausencia de finos y polvo mineral. Se introduce la probeta en una estufa de aire forzado a la temperatura de 80 o 163 °C, y se ensaya tras diferentes periodos de permanencia.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La mezcla asfáltica utilizada en el desarrollo experimental cumple las siguientes especificaciones: granulometría tipo E, con un porcentaje óptimo de bitumen de 4,9%, con un AC-20, compactado a una temperatura de 140 ± 5 °C.

4.1. Equipo a utilizar

El equipo estándar utilizado para los Ensayos para mezclas asfálticas en caliente por el Método Marshall, se enlistan a continuación:

- Prensa de estabilidad Marshall, provista de un anillo de lectura de resistencia con capacidad de 10 000 libras (44,50 KN).
- Cabeza de rotura de estabilidad Marshall, de 4 pulgadas (101,7 mm) de diámetro. Peso total de 20 libras (9 kg.).
- Molde de compactación Marshall, de 4 pulgadas (101,7 mm) de diámetro. Peso de 8 libras (3,6 kg).
- Martillo de compactación Marshall, de 10 libras (4,54 kg.) con una altura de caída de 18 pulgadas (457 mm.). Peso total de 17 libras (7,7 kg.).
- Pedestal de compactación, con dimensiones de 8 x 8 pulgadas de lado y 18 pulgadas de altura. Con un peso total de 85 libras (38 kg.).
- Placa superior del pedestal de compactación, con dimensiones de 12 x 12 pulgadas de lado y 1 pulgada de espesor.

- Baño de circulación de agua, tipo magnético, con capacidad de calentar hasta 12 probetas Marshall de 4 pulgadas. Con termómetro de control. Con un peso total de 47 libras (21,4 kg.).
- Picnómetro de vacíos, con capacidad de 2 000 gramos y un peso total de 15 libras (6,8kg.).
- Extractor de la centrífuga del asfalto, velocidad variable entre 0 - 6 600 revoluciones por minuto, con freno de parada automático. Peso total de 70 libras (32 kg.).

Figura 12. **Prensa de estabilidad Marshall**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 13. **Cabeza de estabilidad Marshall**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 14. **Moldes de compactación Marshall**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 15. **Martillo de compactación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 16. **Pedestal de compactación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 17. Baño de circulación de agua



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 18. Picnómetro de vacíos



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 19. **Extractor de la centrifuga de asfaltos**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.2. **Datos y cálculos efectuados**

- Alturas y diámetros

Probeta marshall(M1)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,95 \text{ mm} + 65,78 \text{ mm} + 65,40 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,38 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,41 \text{ mm} + 101,18 \text{ mm} + 101,46 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,35 \text{ mm}$$

Probeta marshall(M2)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,51 \text{ mm} + 66,98 \text{ mm} + 65,84 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 66,11 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,41 \text{ mm} + 101,18 \text{ mm} + 101,46 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,35 \text{ mm}$$

Probeta marshall(M3)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,51 \text{ mm} + 64,60 \text{ mm} + 63,25 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,79 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,40 \text{ mm} + 101,50 \text{ mm} + 101,10 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,33 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente (A1)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(67,22 \text{ mm} + 67,13 \text{ mm} + 66,96 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 67,10 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,38 \text{ mm} + 101,29 \text{ mm} + 101,41 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,36 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A2)**

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(65,12 \text{ mm} + 65,65 \text{ mm} + 65,26 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 65,34 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,13 \text{ mm} + 101,37 \text{ mm} + 101,38 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,29 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A3)**

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(65,69 \text{ mm} + 64,40 \text{ mm} + 64,24 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 64,78 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,06 \text{ mm} + 101,29 \text{ mm} + 101,74 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,36 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A4)**

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(63,02 \text{ mm} + 63,95 \text{ mm} + 63,47 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 63,48 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,54 \text{ mm} + 101,35 \text{ mm} + 101,49 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,46 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,93 \text{ mm} + 65,52 \text{ mm} + 66,60 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 66,02 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,65 \text{ mm} + 101,41 \text{ mm} + 101,46 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 10,51 \text{ mm}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,79 \text{ mm} + 65,33 \text{ mm} + 64,49 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,20 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,23 \text{ mm} + 100,59 \text{ mm} + 101,40 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 100,74 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC1)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,79 \text{ mm} + 65,52 \text{ mm} + 64,55 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,29 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,25 \text{ mm} + 101,41 \text{ mm} + 101,47 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,38 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C(AC2)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(64,95 \text{ mm} + 66,78 \text{ mm} + 63,22 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 64,98 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,54 \text{ mm} + 101,47 \text{ mm} + 101,57 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,53 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C(AC3)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(65,65 \text{ mm} + 65,76 \text{ mm} + 69,43 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 66,95 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,34 \text{ mm} + 100,98 \text{ mm} + 100,96 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,09 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C(AC4)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(67,13 \text{ mm} + 65,08 \text{ mm} + 64,86 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 65,69 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,54 \text{ mm} + 101,56 \text{ mm} + 101,38 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,49 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C**(AC5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,33 \text{ mm} + 64,22 \text{ mm} + 63,44 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,33 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,65 \text{ mm} + 101,59 \text{ mm} + 101,59 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,61 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C**(AC6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(66,77 \text{ mm} + 64,98 \text{ mm} + 69,11 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 66,95 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,99 \text{ mm} + 101,04 \text{ mm} + 101,45 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,16 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C**(AF1)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,33 \text{ mm} + 63,87 \text{ mm} + 65,23 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,48 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(100,43 \text{ mm} + 101,50 \text{ mm} + 101,36 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,10 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF2)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,07 \text{ mm} + 63,08 \text{ mm} + 68,43 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,53 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,34 \text{ mm} + 101,03 \text{ mm} + 101,67 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,35 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF3)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,59 \text{ mm} + 64,49 \text{ mm} + 63,52 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,20 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,54 \text{ mm} + 101,58 \text{ mm} + 101,48 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,53 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF4)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,53 \text{ mm} + 60,11 \text{ mm} + 64,75 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 62,80 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,37 \text{ mm} + 100,89 \text{ mm} + 101,68 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,31 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,78 \text{ mm} + 65,43 \text{ mm} + 66,43 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,88 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,49 \text{ mm} + 101,47 \text{ mm} + 101,59 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,52 \text{ mm}$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,12 \text{ mm} + 65,08 \text{ mm} + 67,43 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,88 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,41 \text{ mm} + 101,87 \text{ mm} + 101,47 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,58 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C1)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(66,78 \text{ mm} + 65,54 \text{ mm} + 64,59 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,64 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,44 \text{ mm} + 101,50 \text{ mm} + 101,64 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,53 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C2)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,33 \text{ mm} + 65,06 \text{ mm} + 64,59 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,66 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,32 \text{ mm} + 101,44 \text{ mm} + 101,29 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,35 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C3)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(62,75 \text{ mm} + 62,43 \text{ mm} + 64,35 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,18 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,10 \text{ mm} + 101,68 \text{ mm} + 101,34 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,37 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C4)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,13 \text{ mm} + 63,46 \text{ mm} + 64,42 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,00 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,32 \text{ mm} + 101,34 \text{ mm} + 101,25 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,30 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(68,50 \text{ mm} + 69,24 \text{ mm} + 70,48 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 69,41 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,20 \text{ mm} + 101,44 \text{ mm} + 100,64 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,09 \text{ mm}$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3°C **(C6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,97 \text{ mm} + 66,29 \text{ mm} + 65,74 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,67 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,24 \text{ mm} + 101,55 \text{ mm} + 101,38 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,39 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H1)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(58,29 \text{ mm} + 60,11 \text{ mm} + 59,56 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 59,32 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,67 \text{ mm} + 101,82 \text{ mm} + 101,54 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,68 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H2)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,41 \text{ mm} + 63,46 \text{ mm} + 63,11 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,33 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,07 \text{ mm} + 101,38 \text{ mm} + 101,19 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,21 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H3)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,36 \text{ mm} + 63,94 \text{ mm} + 63,47 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,92 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,32 \text{ mm} + 101,51 \text{ mm} + 101,07 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,30 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H4)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,59 \text{ mm} + 67,17 \text{ mm} + 66,11 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 66,29 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,37 \text{ mm} + 101,08 \text{ mm} + 101,75 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,40 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(66,88 \text{ mm} + 69,87 \text{ mm} + 69,82 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 68,86 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,37 \text{ mm} + 101,08 \text{ mm} + 101,75 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,40 \text{ mm}$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C **(H6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(66,88 \text{ mm} + 69,87 \text{ mm} + 69,82 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 68,86 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,21 \text{ mm} + 101,05 \text{ mm} + 101,31 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,19 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 **(AÑ1)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,22 \text{ mm} + 64,17 \text{ mm} + 64,82 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,07 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,41 \text{ mm} + 101,00 \text{ mm} + 101,32 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,24 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 (**AÑ2**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,24 \text{ mm} + 64,08 \text{ mm} + 65,05 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,79 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,40 \text{ mm} + 101,05 \text{ mm} + 101,16 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,20 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 (**AÑ3**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,73 \text{ mm} + 64,60 \text{ mm} + 64,03 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,12 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,24 \text{ mm} + 101,51 \text{ mm} + 101,55 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,43 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 (**AÑ4**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,29 \text{ mm} + 63,87 \text{ mm} + 65,33 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,50 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,53 \text{ mm} + 101,93 \text{ mm} + 101,03 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,50 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 (**AÑ5**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,89 \text{ mm} + 64,18 \text{ mm} + 64,69 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,25 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,43 \text{ mm} + 101,43 \text{ mm} + 101,26 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,37 \text{ mm}$$

Probeta en agua con caña, con una relación del 1 : 1 (**AÑ6**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(62,14 \text{ mm} + 62,78 \text{ mm} + 61,84 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 62,25 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,20 \text{ mm} + 101,33 \text{ mm} + 101,33 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,29 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 grs. / litro)(**AS1**)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,05 \text{ mm} + 62,95 \text{ mm} + 63,14 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,38 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,23 \text{ mm} + 100,92 \text{ mm} + 101,23 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,13 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)(AS2)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(65,66 \text{ mm} + 65,13 \text{ mm} + 65,74 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 65,51 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,52 \text{ mm} + 101,68 \text{ mm} + 101,02 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,41 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)(AS3)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(67,41 \text{ mm} + 65,93 \text{ mm} + 64,89 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 66,08 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,66 \text{ mm} + 101,16 \text{ mm} + 101,46 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,43 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 grs. / litro)(AS4)

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = \frac{(62,84 \text{ mm} + 63,09 \text{ mm} + 64,61 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Altura}_{\text{Promedio}} = 63,51 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = \frac{(101,64 \text{ mm} + 101,37 \text{ mm} + 101,20 \text{ mm})}{3}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Promedio}} = 101,40 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 grs. / litro)(AS5)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,94 \text{ mm} + 63,28 \text{ mm} + 64,04 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 63,75 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,09 \text{ mm} + 101,15 \text{ mm} + 101,39 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,21 \text{ mm}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)(AS6)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,71 \text{ mm} + 65,80 \text{ mm} + 66,57 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,69 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,29 \text{ mm} + 101,19 \text{ mm} + 101,20 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,23 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro(ASAL1)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(57,07 \text{ mm} + 57,84 \text{ mm} + 57,58 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 57,50 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,35 \text{ mm} + 101,35 \text{ mm} + 101,50 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,40 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro(ASAL2)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(66,55 \text{ mm} + 65,27 \text{ mm} + 65,92 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,91 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,80 \text{ mm} + 101,80 \text{ mm} + 101,90 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,83 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro(ASAL3)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,37 \text{ mm} + 65,49 \text{ mm} + 64,58 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,81 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,36 \text{ mm} + 101,41 \text{ mm} + 101,52 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,43 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro (ASAL4)

$$Altura_{Promedio} = \frac{(63,24 \text{ mm} + 62,30 \text{ mm} + 62,83 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 62,79 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,41 \text{ mm} + 101,43 \text{ mm} + 101,32 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,39 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro **(ASAL5)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(64,73 \text{ mm} + 63,59 \text{ mm} + 64,83 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 64,38 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(100,98 \text{ mm} + 101,55 \text{ mm} + 101,48 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,34 \text{ mm}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro **(ASAL6)**

$$Altura_{Promedio} = \frac{(65,60 \text{ mm} + 65,59 \text{ mm} + 64,56 \text{ mm})}{3}$$

$$Altura_{Promedio} = 65,25 \text{ mm}$$

$$Diámetro_{Promedio} = \frac{(101,25 \text{ mm} + 100,84 \text{ mm} + 101,24 \text{ mm})}{3}$$

$$Diámetro_{Promedio} = 101,11 \text{ mm}$$

- Gravedad específica BULK y densidad de la mezcla asfáltica

Probeta Marshall**(M1)**

$$Bulk = \frac{1\ 070,63 \text{ g}}{1\ 079,62 \text{ g} - 616,73 \text{ g}}$$

$$Bulk = 2,31$$

Probeta Marshall(**M2**)

$$Bulk = \frac{1\,197,43\text{ g}}{1\,205,60\text{ g} - 693,33\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,34$$

Probeta Marshall(**M3**)

$$Bulk = \frac{1\,180,65\text{ g}}{1\,190,33\text{ g} - 682,27\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,32$$

Probeta en aguaa temperatura ambiente (**A1**)

$$Bulk = \frac{1\,196,90\text{ g}}{1\,208,30\text{ g} - 688,78\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,30$$

Probeta en aguaa temperatura ambiente (**A2**)

$$Bulk = \frac{1\,177,37\text{ g}}{1\,188,54\text{ g} - 679,45\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,31$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A3)**

$$Bulk = \frac{1\,193,04\text{ g}}{1\,200,20\text{ g} - 692,87\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,35$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A4)**

$$Bulk = \frac{1\,177,06\text{ g}}{1\,185,16\text{ g} - 683,61\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,35$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A5)**

$$Bulk = \frac{1\,188,33\text{ g}}{1\,196,41\text{ g} - 686,26\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,33$$

Probeta en agua a temperatura ambiente **(A6)**

$$Bulk = \frac{1\,209,02\text{ g}}{1\,217,60\text{ g} - 697,87\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,33$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC1)**

$$Bulk = \frac{1\,187,03\text{ g}}{1\,196,21\text{ g} - 688,69\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,34$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC2)**

$$Bulk = \frac{1\,203,48\text{ g}}{1\,212,85\text{ g} - 696,87\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,33$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC3)**

$$Bulk = \frac{1\,184,94\text{ g}}{1\,187,26\text{ g} - 692,83\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,40$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC4)**

$$Bulk = \frac{1\,200,60\text{ g}}{1\,205,83\text{ g} - 699,34\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC5)**

$$Bulk = \frac{1\,197,46\text{ g}}{1\,203,57\text{ g} - 695,81\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua a una temperatura de 60 °C **(AC6)**

$$Bulk = \frac{1\,192,79\text{ g}}{1\,197,64\text{ g} - 689,87\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,35$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF1)**

$$Bulk = \frac{1\,193,36\text{ g}}{1\,199,48\text{ g} - 692,60\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,35$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF2)**

$$Bulk = \frac{1\,173,87\text{ g}}{1\,180,07\text{ g} - 682,26\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF3)**

$$Bulk = \frac{1\,196,28\,g}{1\,202,21\,g - 695,25\,g}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF4)**

$$Bulk = \frac{1\,198,17\,g}{1\,207,66\,g - 689,79\,g}$$

$$Bulk = 2,31$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF5)**

$$Bulk = \frac{1\,205,26\,g}{1\,210,13\,g - 699,06\,g}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua a una temperatura de 10 °C **(AF6)**

$$Bulk = \frac{1\,196,70\,g}{1\,207,66\,g - 698,38\,g}$$

$$Bulk = 2,38$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C**(C1)**

$$Bulk = \frac{1\,224,66\text{ g}}{1\,231,02\text{ g} - 713,89\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C**(C2)**

$$Bulk = \frac{1\,192,32\text{ g}}{1\,199,82\text{ g} - 690,85\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,34$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C**(C3)**

$$Bulk = \frac{1\,184,94\text{ g}}{1\,190,27\text{ g} - 690,57\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C**(C4)**

$$Bulk = \frac{1\,200,99\text{ g}}{1\,205,31\text{ g} - 701,67\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,38$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C**(C5)**

$$Bulk = \frac{1\,213,80\text{ g}}{1\,231,55\text{ g} - 697,35\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,27$$

Probeta en congelador a una temperatura de -3 °C **(C6)**

$$Bulk = \frac{1\,188,77\text{ g}}{1\,198,43\text{ g} - 684,87\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,31$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C**(H1)**

$$Bulk = \frac{1\,070,84\text{ g}}{1\,079,27\text{ g} - 617,67\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,32$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C**(H2)**

$$Bulk = \frac{1\,181,80\text{ g}}{1\,186,39\text{ g} - 686,80\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C(**H3**)

$$Bulk = \frac{1\,197,05\,g}{1\,201,87\,g - 697,81\,g}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C(**H4**)

$$Bulk = \frac{1\,199,50\,g}{1\,208,78\,g - 688,93\,g}$$

$$Bulk = 2,31$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C(**H5**)

$$Bulk = \frac{1\,203,25\,g}{1\,224,13\,g - 686,48\,g}$$

$$Bulk = 2,24$$

Probeta en horno a una temperatura de 100 °C(**H6**)

$$Bulk = \frac{1\,199,26\,g}{1\,203,32\,g - 700,41\,g}$$

$$Bulk = 2,38$$

Probeta en agua con caña , con una relación 1 : 1 (**AÑ1**)

$$Bulk = \frac{1\,194,61\,g}{1\,200,05\,g - 695,43\,g}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1(**AÑ2**)

$$Bulk = \frac{1\,199,49\,g}{1\,205,57\,g - 696,74\,g}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1(**AÑ3**)

$$Bulk = \frac{1\,195,70\,g}{1\,201,00\,g - 696,79\,g}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1(**AÑ4**)

$$Bulk = \frac{1\,189,94\,g}{1\,196,49\,g - 691,60\,g}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1(AÑ5)

$$Bulk = \frac{1\ 184,54\ g}{1\ 191,16\ g - 690,17\ g}$$

$$Bulk = 2,36$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1(AÑ6)

$$Bulk = \frac{1\ 171,29\ g}{1\ 176,59\ g - 686,42\ g}$$

$$Bulk = 2,39$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 Grs./Litro)(AS1)

$$Bulk = \frac{1\ 179,63\ g}{1\ 185,13\ g - 683,18\ g}$$

$$Bulk = 2,35$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1(106 Grs./Litro)(AS2)

$$Bulk = \frac{1\ 187,04\ g}{1\ 199,20\ g - 680,00\ g}$$

$$Bulk = 2,29$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 Grs./Litro)(AS3)

$$Bulk = \frac{1\,198,28\,g}{1\,209,62\,g - 693,27\,g}$$

$$Bulk = 2,32$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 Grs./Litro)(AS4)

$$Bulk = \frac{1\,189,76\,g}{1\,193,82\,g - 695,06\,g}$$

$$Bulk = 2,39$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 Grs./Litro)(AS5)

$$Bulk = \frac{1\,185,73\,g}{1\,190,83\,g - 690,90\,g}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 Grs./Litro)(AS6)

$$Bulk = \frac{1\,203,95\,g}{1\,210,70\,g - 696,67\,g}$$

$$Bulk = 2,34$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(**ASAL1**)

$$Bulk = \frac{1\ 067,63\ g}{1\ 074,11\ g - 623,65\ g}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(**ASAL2**)

$$Bulk = \frac{1\ 202,78\ g}{1\ 211,82\ g - 696,61\ g}$$

$$Bulk = 2,33$$

Probeta de agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(**ASAL3**)

$$Bulk = \frac{1\ 215,74\ g}{1\ 220,14\ g - 710,65\ g}$$

$$Bulk = 2,39$$

Probeta de agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(**ASAL4**)

$$Bulk = \frac{1\ 181,42\ g}{1\ 186,17\ g - 690,84\ g}$$

$$Bulk = 2,39$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(ASAL5)

$$Bulk = \frac{1\,192,59\text{ g}}{1\,198,76\text{ g} - 694,86\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,37$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 Grs. / Litro(ASAL6)

$$Bulk = \frac{1\,205,26\text{ g}}{1\,210,70\text{ g} - 700,42\text{ g}}$$

$$Bulk = 2,36$$

- Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos

$$Rice_1 = \frac{1\,000\text{ g}}{1\,000\text{ g} + 7\,379,80\text{ g} - 7\,976,16\text{ g}}$$

$$Rice_1 = 2,474$$

$$Rice_2 = \frac{1\,000\text{ g}}{1\,000\text{ g} + 7\,367,00\text{ g} - 7\,968,00\text{ g}}$$

$$Rice_2 = 2,506$$

$$Rice_{Promedio} = \frac{2,474 + 2,506}{2}$$

$$Rice_{Promedio} = 2,492$$

- Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen

$$T_{compactación} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

Pastilla II

$$V_a = 100 \left(1 - \frac{2,374}{2,492}\right) \quad V_a = 100 \left(1 - \frac{2,371}{2,492}\right)$$

$$V_a = 4,735$$

$$V_a = 4,856$$

- Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall

Probeta Marshall(M1)

$$Estabilidad = 293$$

$$Flujo = 17$$

$$Estabilidad = \frac{193 (2\ 800) \text{ Lbs.}_F}{(295,5)}$$

$$Flujo = 17 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 776,31 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,17 in$$

Probeta Marshall(M2)

$$Estabilidad = 283$$

$$Flujo = 15$$

$$Estabilidad = \frac{283 (2\,700) \text{ Lbs}_F}{(284,9)}$$

$$Flujo = 15 (0,01) \text{ in}$$

$$Estabilidad = 2\,682,00 \text{ Lbs}_F$$

$$Flujo = 0,15 \text{ in}$$

Probeta Marshall(M3)

$$Estabilidad = 300$$

$$Flujo = 13$$

$$Estabilidad = \frac{300 (2\,850) \text{ Lbs}_F}{(300,8)}$$

$$Flujo = 13 (0,01) \text{ in}$$

$$Estabilidad = 2\,842,42 \text{ Lbs}_F$$

$$Flujo = 0,13 \text{ in}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente, sumergida 5 días (A-5)

$$Estabilidad = 110$$

$$Flujo = 15$$

$$Estabilidad = \frac{110 (1\,050) \text{ Lbs}_F}{(110,4)}$$

$$Flujo = 15 (0,01) \text{ in}$$

$$Estabilidad = 1\,046,20 \text{ Lbs}_F$$

$$Flujo = 0,15 \text{ in}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente, sumergida 10 días(A-10)

$$Estabilidad = 290$$

$$Flujo = 10$$

$$Estabilidad = \frac{290 (2\,750) \text{ Lbs}_F}{(290,2)}$$

$$Flujo = 10 (0,01) \text{ in}$$

$$Estabilidad = 2\,748,10 \text{ Lbs}_F$$

$$Flujo = 0,10 \text{ in}$$

Probeta en agua a temperatura ambiente, sumergida 15 días **(A-15)**

$$\begin{aligned} \text{Estabilidad} &= 265 & \text{Flujo} &= 15 \\ \text{Estabilidad} &= \frac{265 (2\,550) \text{ Lbs.}_F}{(269,0)} & \text{Flujo} &= 15 (0,01)in \\ \text{Estabilidad} &= 2\,512,37 \text{ Lbs.}_F & \text{Flujo} &= 0,15 in \end{aligned}$$

Probeta en agua a temperatura de 60 °C, sumergida 5 días **(AC-5)**

$$\begin{aligned} \text{Estabilidad} &= 301 & \text{Flujo} &= 10 \\ \text{Estabilidad} &= \frac{301 (2\,900) \text{ Lbs.}_F}{(306,2)} & \text{Flujo} &= 10 (0,01)in \\ \text{Estabilidad} &= 2\,850,75 \text{ Lbs.}_F & \text{Flujo} &= 0,10 in \end{aligned}$$

Probeta en agua a temperatura de 60 °C, sumergida 10 días **(AC-10)**

$$\begin{aligned} \text{Estabilidad} &= 312 & \text{Flujo} &= 15 \\ \text{Estabilidad} &= \frac{312 (3\,000) \text{ Lbs.}_F}{(316,8)} & \text{Flujo} &= 15 (0,01)in \\ \text{Estabilidad} &= 2\,954,55 \text{ Lbs.}_F & \text{Flujo} &= 0,15 in \end{aligned}$$

Probeta en agua a temperatura de 60 °C, sumergida 15 días **(AC-15)**

$$\begin{aligned} \text{Estabilidad} &= 305 & \text{Flujo} &= 18 \\ \text{Estabilidad} &= \frac{305 (2\,900) \text{ Lbs.}_F}{(306,2)} & \text{Flujo} &= 18 (0,01)in \\ \text{Estabilidad} &= 2\,888,63 \text{ Lbs.}_F & \text{Flujo} &= 0,18 in \end{aligned}$$

Probeta en agua a temperatura de 10 °C, sumergida 5 días **(AF-5)**

$$\text{Estabilidad} = 295$$

$$\text{Flujo} = 16$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{295 (2\,800) \text{ Lbs}_F}{(295,5)}$$

$$\text{Flujo} = 16 (0,01)\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 2\,795,26 \text{ Lbs}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,16 \text{ in}$$

Probeta en agua a temperatura de 10 °C, sumergida 10 días **(AF-10)**

$$\text{Estabilidad} = 428$$

$$\text{Flujo} = 23$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{428 (4\,050) \text{ Lbs}_F}{(428,7)}$$

$$\text{Flujo} = 23 (0,01)\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 4\,043,39 \text{ Lbs}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,23 \text{ in}$$

Probeta en agua a temperatura de 10 °C, sumergida 15 días **(AF-15)**

$$\text{Estabilidad} = 300$$

$$\text{Flujo} = 18$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{300 (2\,850) \text{ Lbs}_F}{(300,8)}$$

$$\text{Flujo} = 18 (0,01)\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 2\,842,42 \text{ Lbs}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,18 \text{ in}$$

Probeta en congelador a temperatura de -3 °C, durante 5 días **(C-5)**

$$\text{Estabilidad} = 420$$

$$\text{Flujo} = 25$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{420 (4\,000) \text{ Lbs}_F}{(423,3)}$$

$$\text{Flujo} = 25 (0,01)\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 3\,968,82 \text{ Lbs}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,25 \text{ in}$$

Probeta en congelador a temperatura de -3 °C, durante 10 días **(C-10)**

$$Estabilidad = 415$$

$$Flujo = 18$$

$$Estabilidad = \frac{415 (3\,950) Lbs.F}{(418,0)}$$

$$Flujo = 18 (0,01) in$$

$$Estabilidad = 3\,921,65 Lbs.F$$

$$Flujo = 0,18 in$$

Probeta en congelador a temperatura de -3 °C, durante 15 días **(C-15)**

$$Estabilidad = 294$$

$$Flujo = 30$$

$$Estabilidad = \frac{294 (2\,800) Lbs.F}{(295,5)}$$

$$Flujo = 30 (0,01) in$$

$$Estabilidad = 2\,785,79 Lbs.F$$

$$Flujo = 0,30 in$$

Probeta en horno a temperatura de 100 °C, durante 5 días **(H-5)**

$$Estabilidad = 293$$

$$Flujo = 24$$

$$Estabilidad = \frac{293 (2\,800) Lbs.F}{(295,5)}$$

$$Flujo = 24 (0,01) in$$

$$Estabilidad = 2\,776,31 Lbs.F$$

$$Flujo = 0,24 in$$

Probeta en horno a temperatura de 100 °C, durante 10 días **(H-10)**

$$Estabilidad = 455$$

$$Flujo = 15$$

$$Estabilidad = \frac{455 (4\,300) Lbs.F}{(455,4)}$$

$$Flujo = 15 (0,01) in$$

$$Estabilidad = 4\,296,22 Lbs.F$$

$$Flujo = 0,15 in$$

Probeta en horno a temperatura de 100 °C, durante 15 días **(H-15)**

$$Estabilidad = 305$$

$$Flujo = 35$$

$$Estabilidad = \frac{305 (2\ 900) \text{ Lbs.}_F}{(306,2)}$$

$$Flujo = 35 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 888,64 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,35 \text{ in}$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1, sumergida 5 días **(AÑ-5)**

$$Estabilidad = 305$$

$$Flujo = 20$$

$$Estabilidad = \frac{305 (2\ 900) \text{ Lbs.}_F}{(306,2)}$$

$$Flujo = 20 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 888,63 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,20 \text{ in}$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1, sumergida 10 días **(AÑ-10)**

$$Estabilidad = 310$$

$$Flujo = 20$$

$$Estabilidad = \frac{310 (2\ 950) \text{ Lbs.}_F}{(311,5)}$$

$$Flujo = 20 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 935,80 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,20 \text{ in}$$

Probeta en agua con caña, con una relación 1 : 1, sumergida 15 días **(AÑ-15)**

$$Estabilidad = 358$$

$$Flujo = 25$$

$$Estabilidad = \frac{358 (3\ 400) \text{ Lbs.}_F}{(359,3)}$$

$$Flujo = 25 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 3\ 387,70 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,25 \text{ in}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1, sumergida 5 días **(AS-5)**

$$Estabilidad = 301$$

$$Flujo = 15$$

$$Estabilidad = \frac{301(2\ 900) \text{ Lbs.}_F}{(306,2)}$$

$$Flujo = 15 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 850,75 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,15 \text{ in}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1, sumergida 10 días **(AS-10)**

$$Estabilidad = 358$$

$$Flujo = 10$$

$$Estabilidad = \frac{358 (3\ 400) \text{ Lbs.}_F}{(359,3)}$$

$$Flujo = 10 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 3\ 387,70 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,10 \text{ in}$$

Probeta en agua con carbonato de sodio, molar 1, sumergida 15 días **(AS-15)**

$$Estabilidad = 279$$

$$Flujo = 8$$

$$Estabilidad = \frac{279 (2\ 650) \text{ Lbs.}_F}{(279,6)}$$

$$Flujo = 8 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 644,31 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,08 \text{ in}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. / litro, sumergida 5 días **(ASAL-5)**

$$Estabilidad = 240$$

$$Flujo = 9$$

$$Estabilidad = \frac{240(2\ 300) \text{ Lbs.}_F}{(242,5)}$$

$$Flujo = 9 (0,01)in$$

$$Estabilidad = 2\ 276,30 \text{ Lbs.}_F$$

$$Flujo = 0,09 \text{ in}$$

Probeta en agua con sal, con una relación de 35 grs. /litro, sumergida 10 días
(ASAL-10)

$$\text{Estabilidad} = 360$$

$$\text{Flujo} = 14$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{360 (3\,450) \text{ Lbs.}_F}{(364,7)}$$

$$\text{Flujo} = 14 (0,01) \text{ in}$$

$$\text{Estabilidad} = 3\,405,54 \text{ Lbs.}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,14 \text{ in}$$

Probeta en agua con sal, con una relación 35 grs. / litro, sumergida 15 días
(ASAL-15)

$$\text{Estabilidad} = 325$$

$$\text{Flujo} = 18$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{325 (3\,100) \text{ Lbs.}_F}{(327,4)}$$

$$\text{Flujo} = 18 (0,01) \text{ in}$$

$$\text{Estabilidad} = 3\,077,28 \text{ Lbs.}_F$$

$$\text{Flujo} = 0,18 \text{ in}$$

4.3. Resultados obtenidos

Tabla VII. **Gravedad específica BULK y densidad de la mezcla asfáltica**

Probeta	5 días	10 días	15 días
Marshall	2,31	2,34	2,32
Agua a temperatura ambiente	2,30	2,35	2,33
Agua a temperatura de 60 °C	2,33	2,38	2,35
Agua a temperatura de 10 °C	2,35	2,33	2,37
Congelador a temperatura de -3°C	2,35	2,37	2,29
Horno a temperatura de 100°C	2,34	2,34	2,31
Agua con caña, con una relación 1 : 1	2,36	2,36	2,37
Agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)	2,32	2,35	2,35
Agua con sal (35 grs. / litro)	2,35	2,39	2,36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla VIII. **Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos**

Probeta I	Probeta II
2,477	2,506

Fuente: Elaboración propia.

Tabla IX. **Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen**

Temperatura °C	Probeta I	Probeta II
160 °C	4,735	4,856

Fuente: Elaboración propia.

Tabla X. **Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los cinco días.**

Probeta	5 días	
	Estabilidad	Flujo
Marshall	2776,31	0,17
Agua a temperatura ambiente	1046,20	0,15
Agua a temperaturade 60 °C	2850,75	0,10
Agua a temperaturade 10 °C	2795,26	0,16
Congelador a temperatura de -3°C	3968,82	0,25
Horno a temperaturade 100°C	2776,31	0,24
Agua con caña, con una relación 1 : 1	2888,63	0,20
Agua con carbonato de sodio, molar 1 (106 grs. / litro)	2850,75	0,15
Agua con sal (35 grs. / litro)	2276,30	0,09

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XI. **Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los diez días.**

Probeta	10 días	
	Estabilidad	Flujo
Marshall	2682,00	0,15
Agua a temperatura ambiente	2748,10	0,10
Agua a temperaturade 60 °C	2954,55	0,15
Agua a temperatura de 10 °C	4043,39	0,23
Congelador a temperatura de -3°C	3921,65	0,18
Horno a temperaturade 100°C	4296,22	0,15
Agua con caña, con una relación 1 : 1	2935,80	0,20
Agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)	3387,70	0,10
Agua con sal (35 grs. / litro)	3405,54	0,14

Fuente: Elaboración propia.

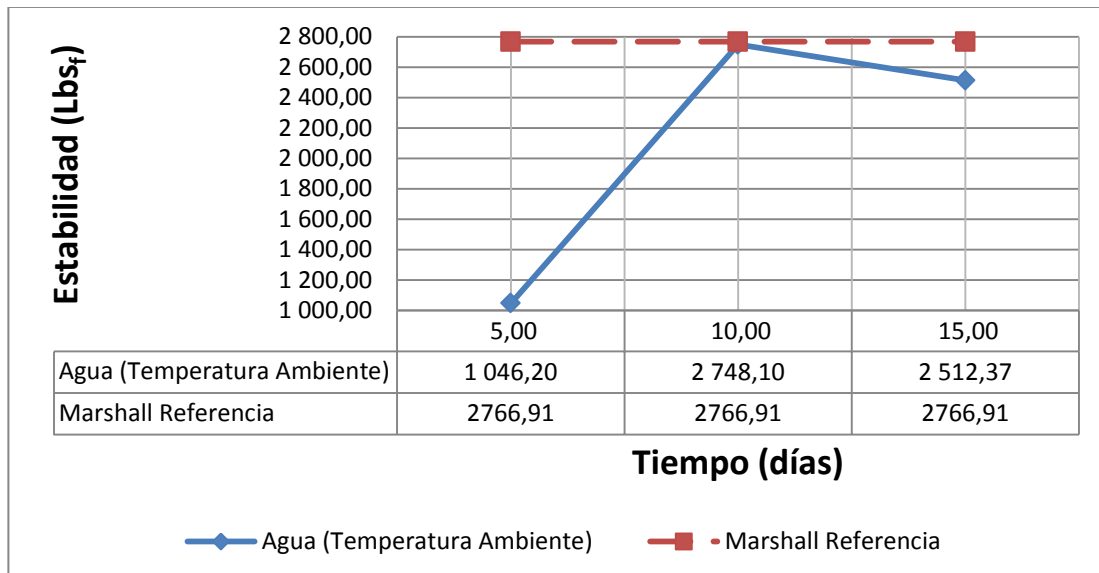
Tabla XII. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato de Marshall, a los quince días.

Probeta	15 días	
	Estabilidad	Flujo
Marshall	2842,42	0,13
Agua a temperatura ambiente	2512,37	0,15
Agua a temperatura de 60 °C	2888,63	0,18
Agua a temperatura de 10 °C	2842,42	0,18
Congelador a temperatura de -3°C	2785,79	0,30
Horno a temperatura de 100°C	2888,64	0,35
Agua con caña, con una relación 1 : 1	3387,70	0,25
Agua con carbonato de sodio, molar 1(106 grs. / litro)	2644,31	0,08
Agua con sal (35 grs. / litro)	3077,28	0,18

Fuente: Elaboración propia.

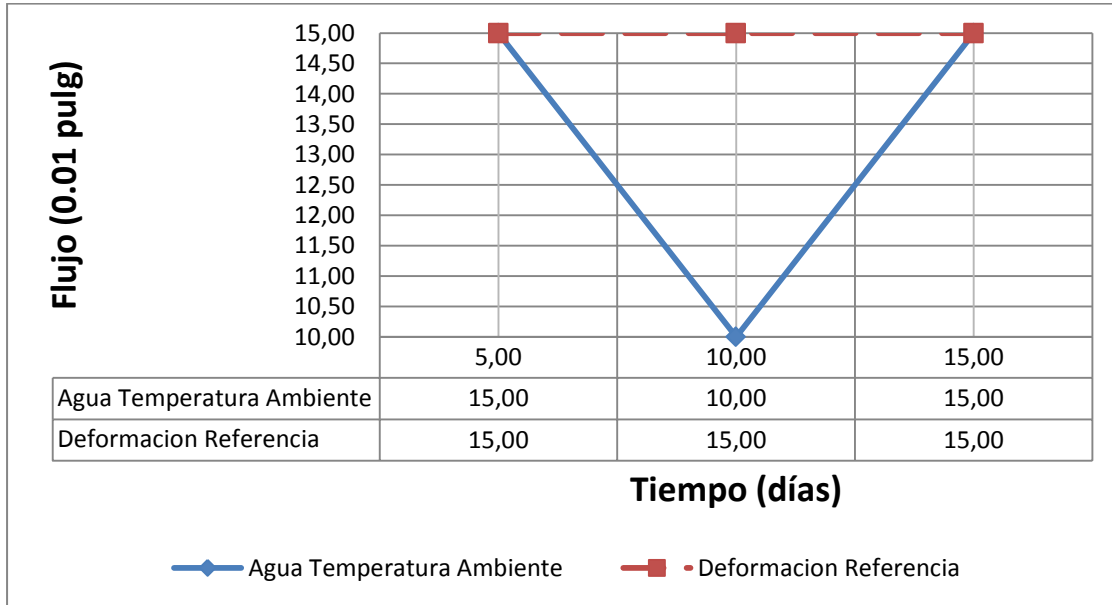
4.4. Gráficas y tablas

Figura 20. Estabilidad Marshall vs. agua a temperatura ambiente.



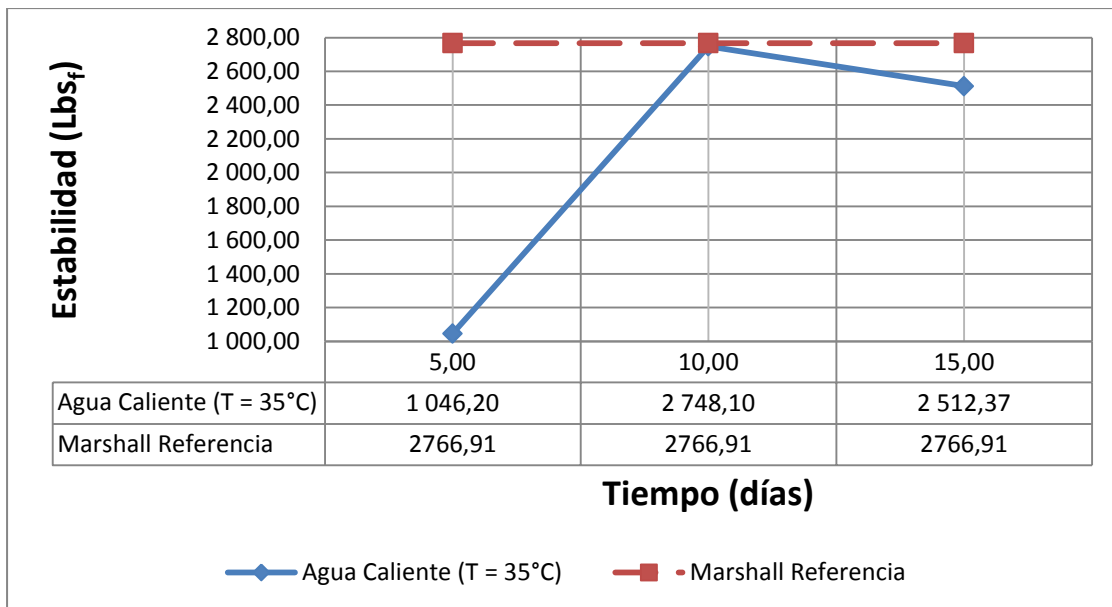
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. **Deformación Marshall vs. agua a temperatura ambiente.**



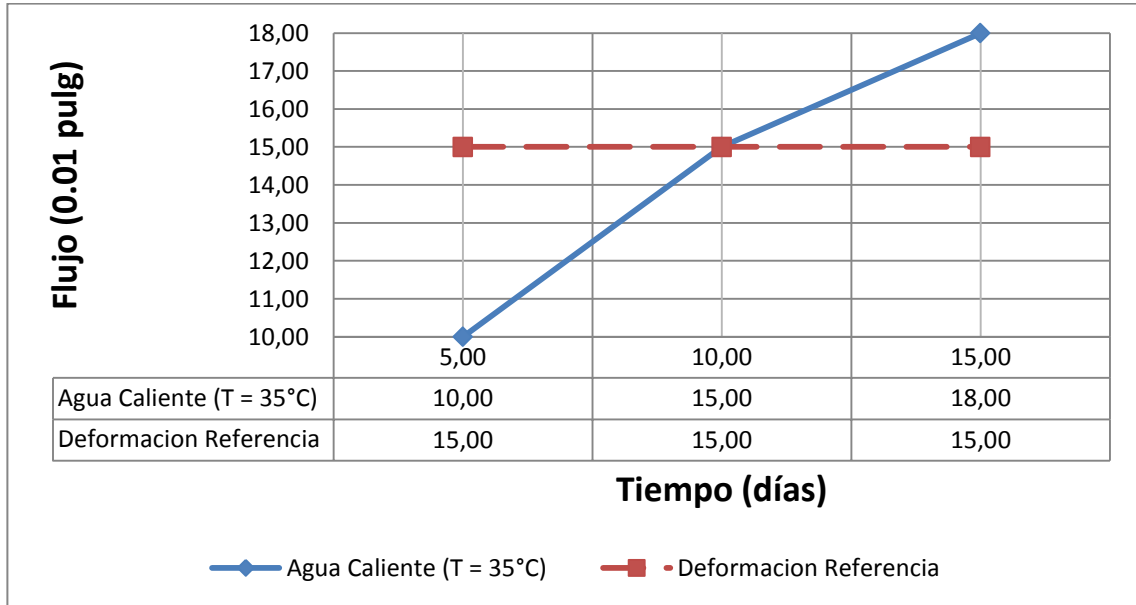
Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. **Estabilidad Marshall vs. agua a temperatura de 60 °C.**



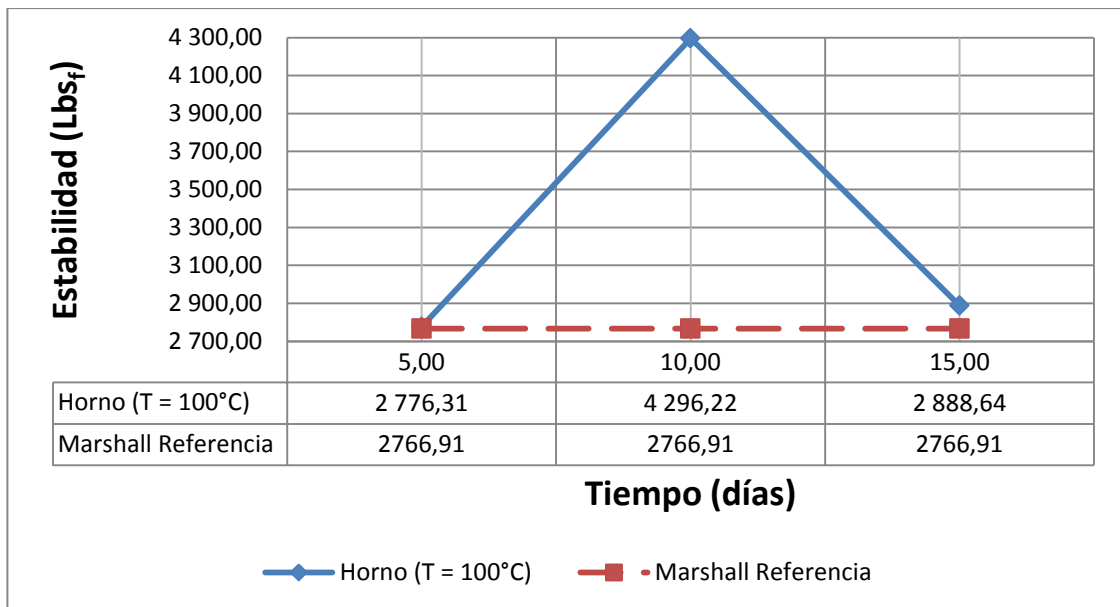
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. **Deformación Marshall vs. agua a temperatura de 60 °C.**



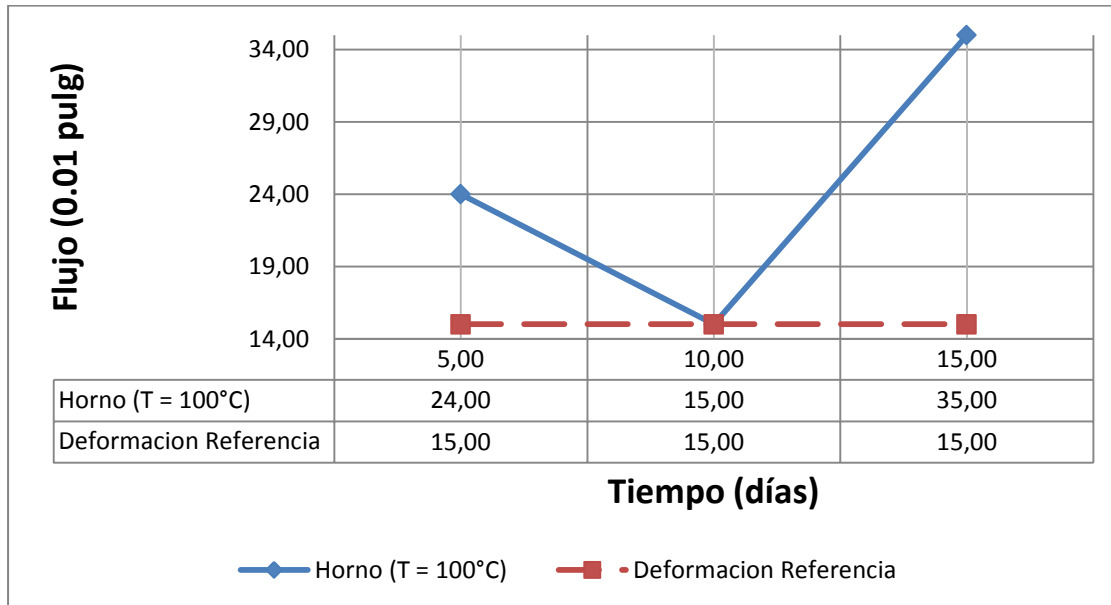
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. **Estabilidad Marshall vs. horno a temperatura de 100 °C.**



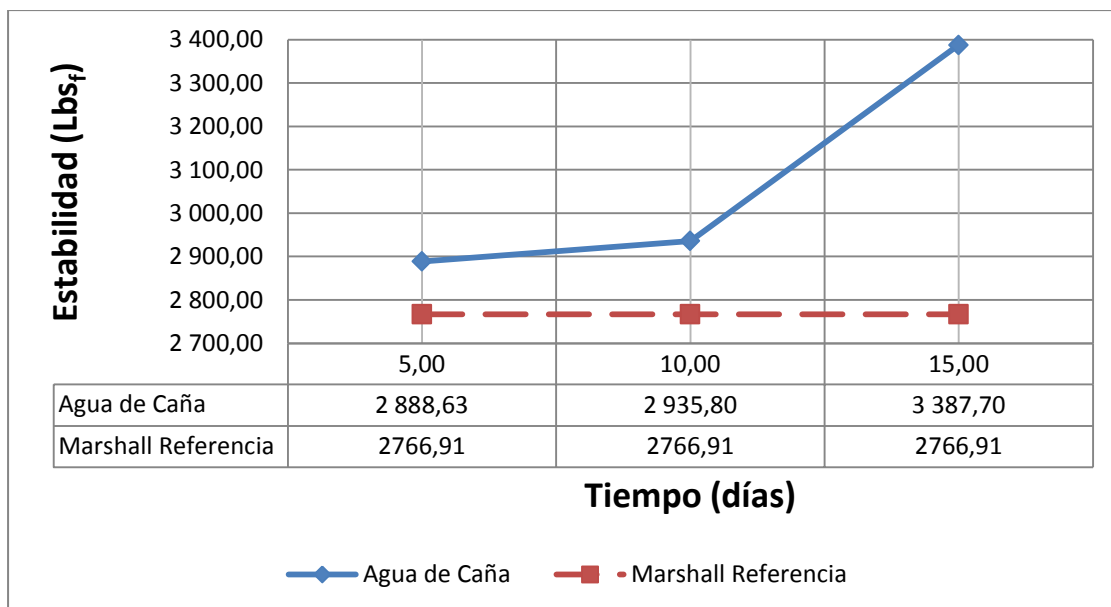
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Deformación Marshall vs. horno a T = 100 °C.



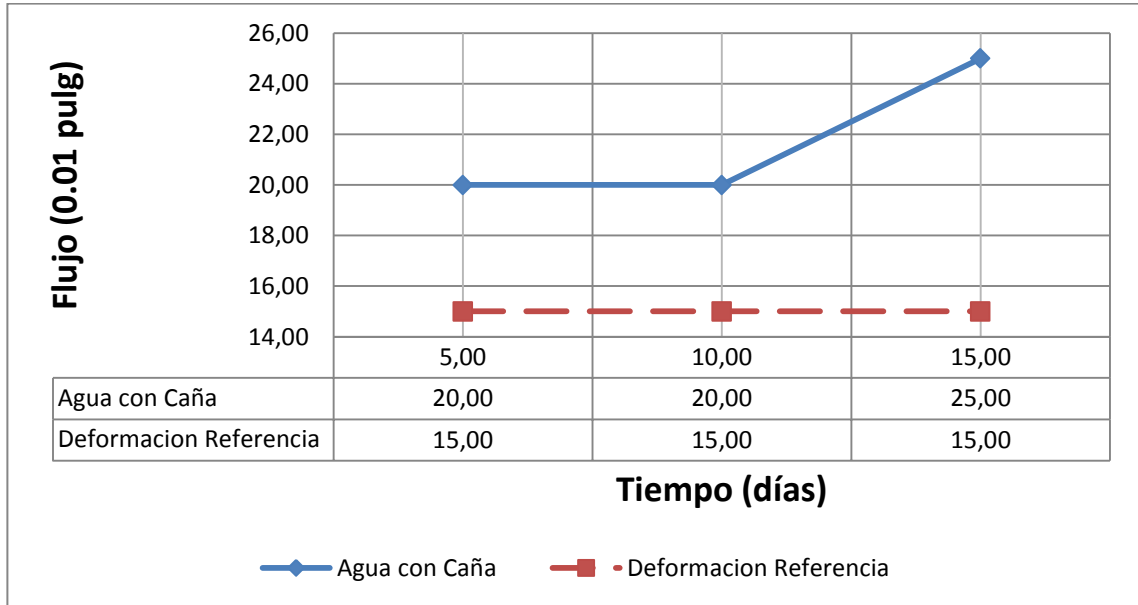
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Estabilidad Marshall vs. agua con caña.



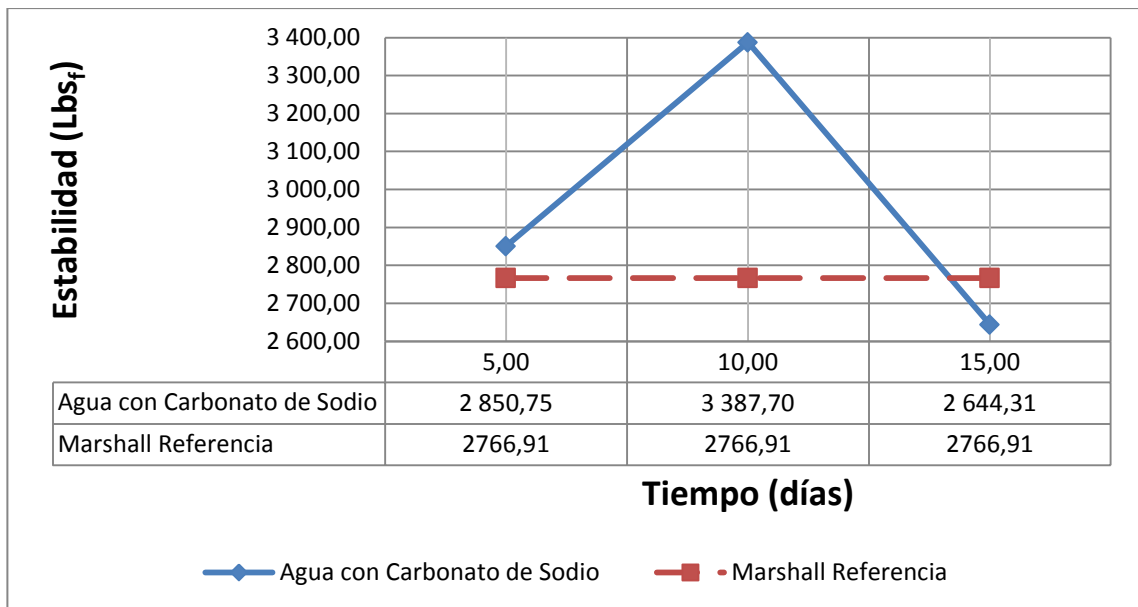
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. **Deformación Marshall vs. agua con caña.**



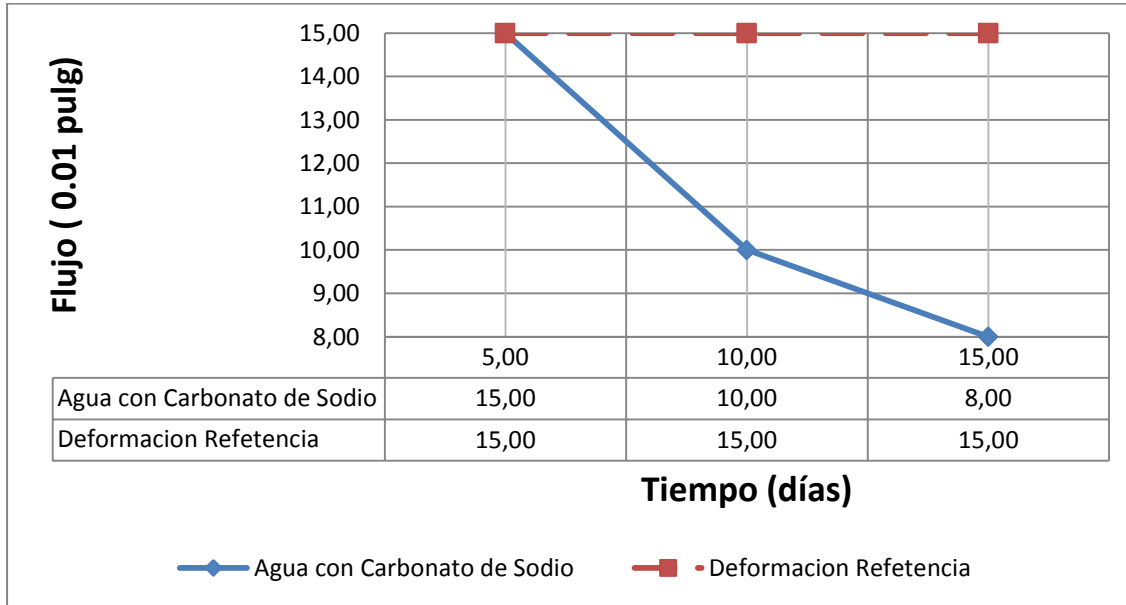
Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. **Estabilidad Marshall vs. agua con carbonato de sodio.**



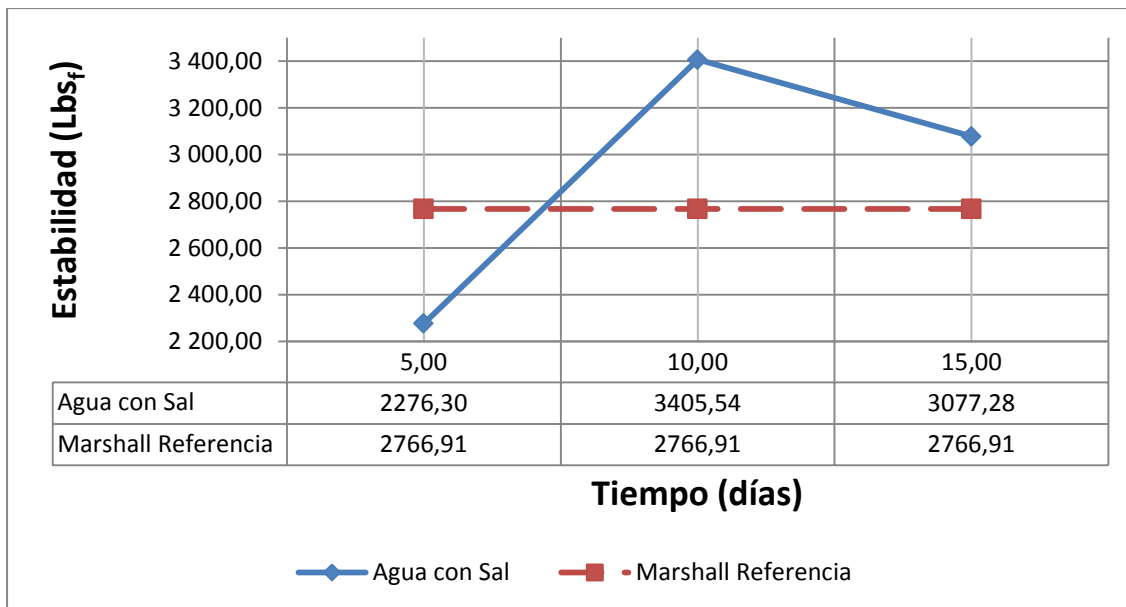
Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. **Deformación Marshall vs. agua con carbonato de sodio.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. **Estabilidad Marshall vs. agua con sal.**



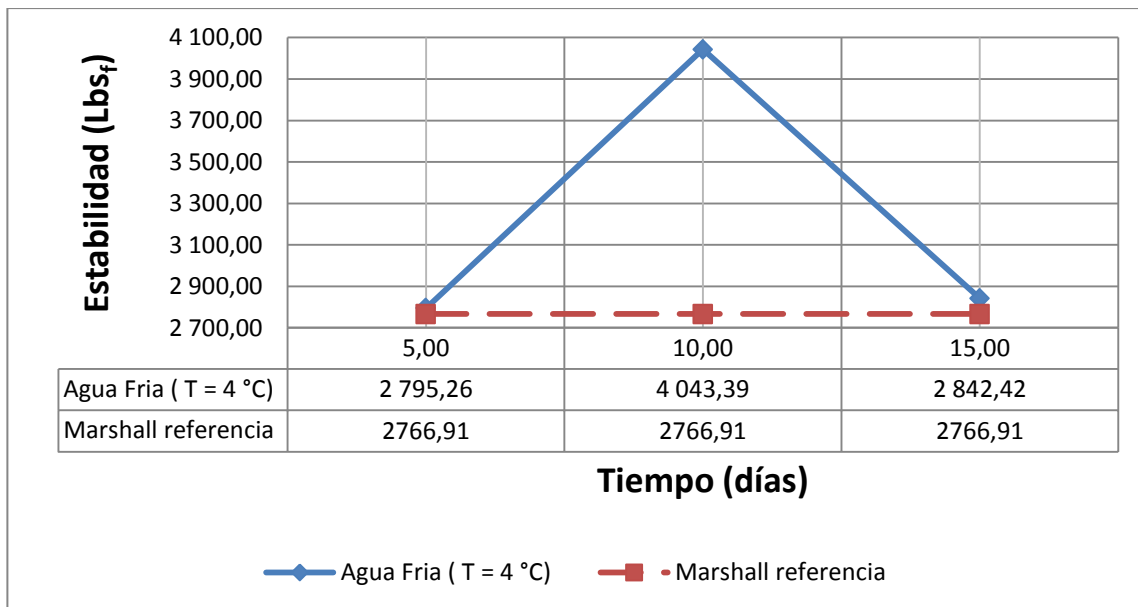
Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Deformación Marshallvs. agua con sal.



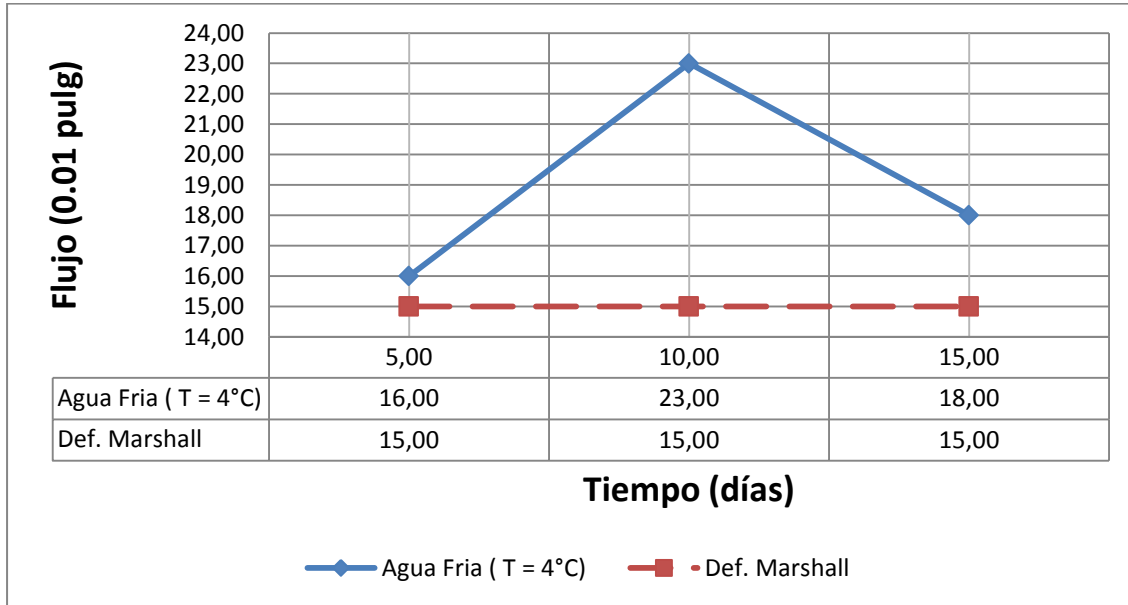
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Estabilidad Marshallvs. agua a temperatura de 10°C



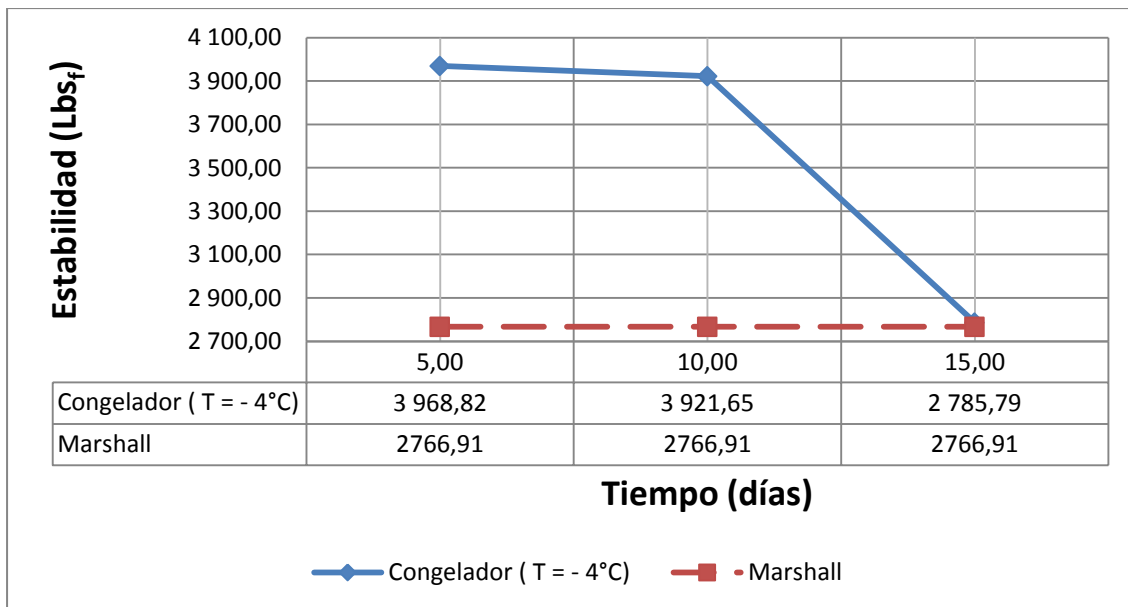
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Deformación Marshall vs. agua a temperatura de 10°C.



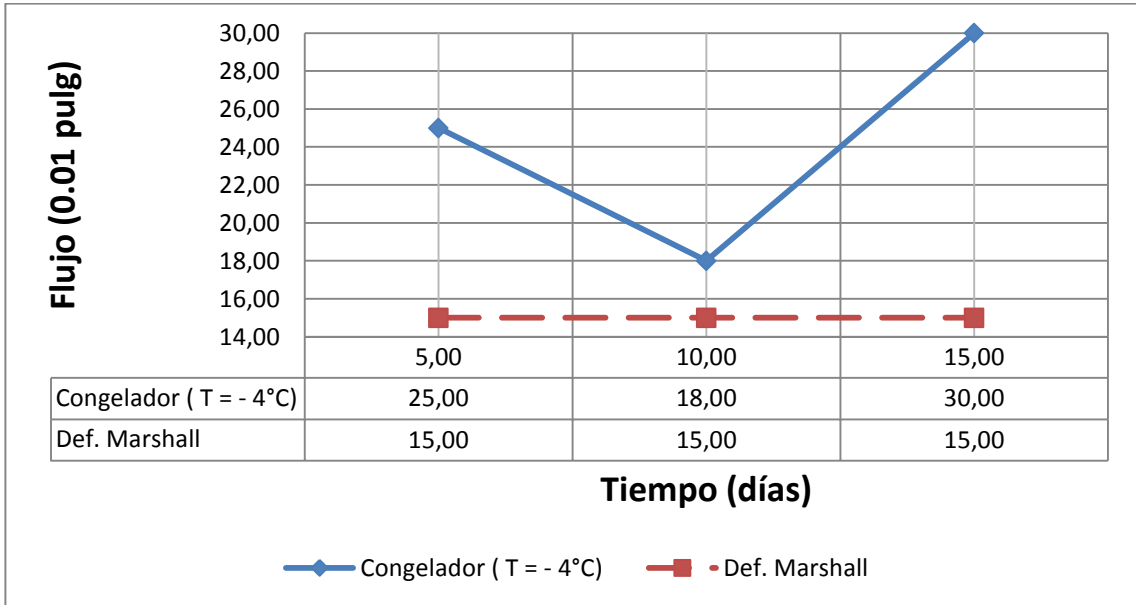
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Estabilidad Marshall vs. congelador a temperatura de - 3°C.



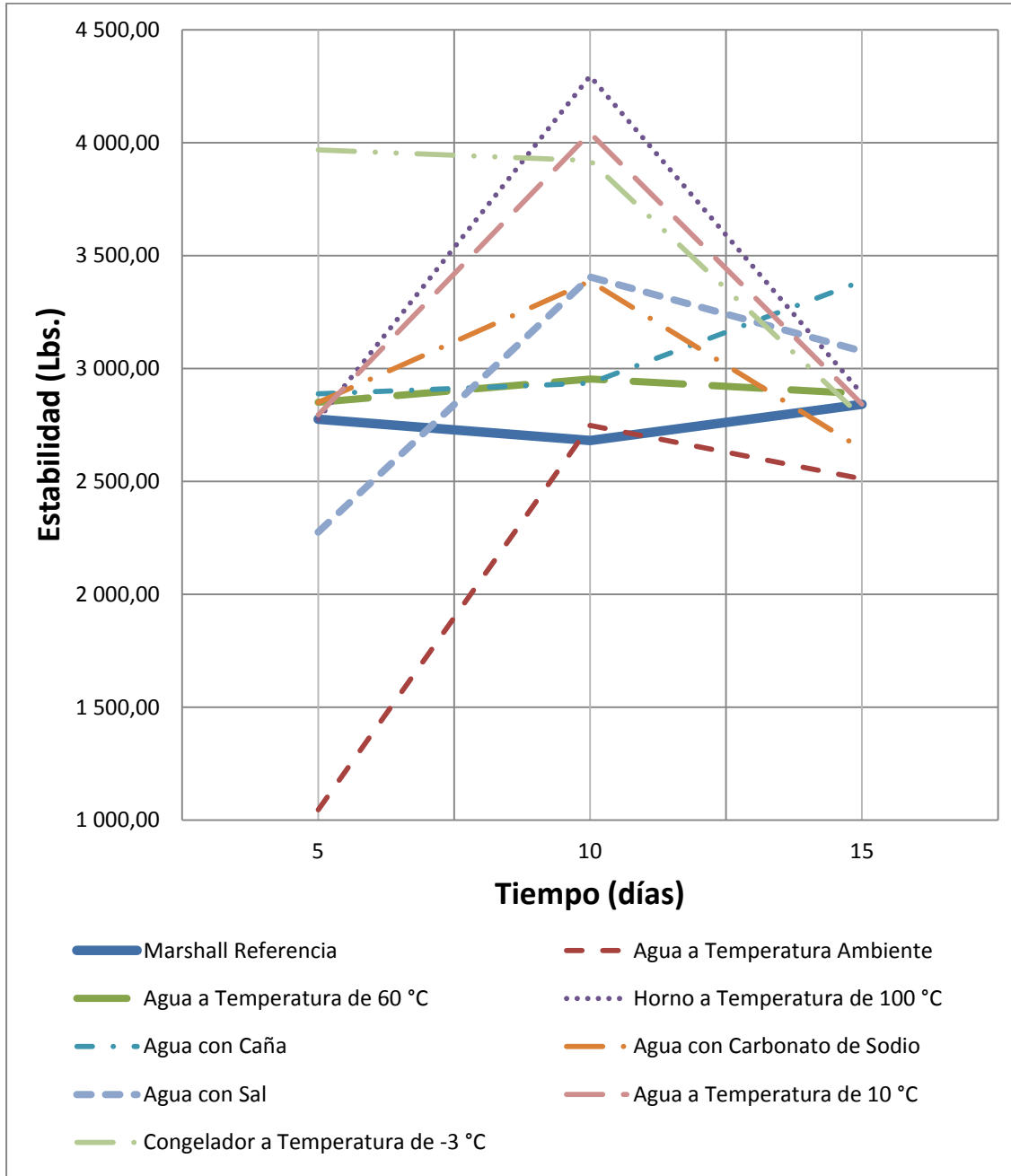
Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. **Deformación Marshall vs. congelador a temperatura de - 3°C.**



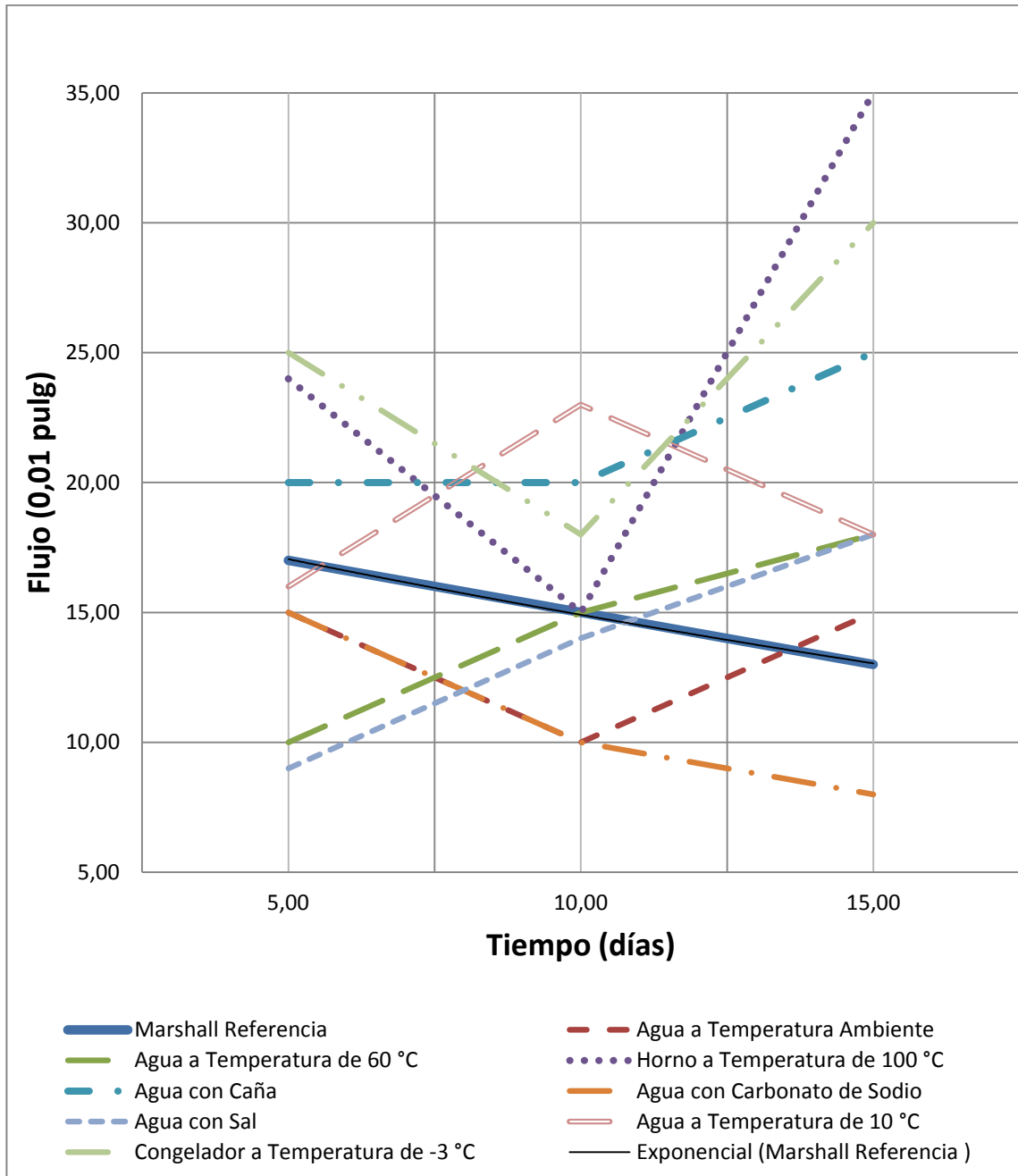
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 36. Estabilidades Marshall.



Fuente: Elaboración Propia.

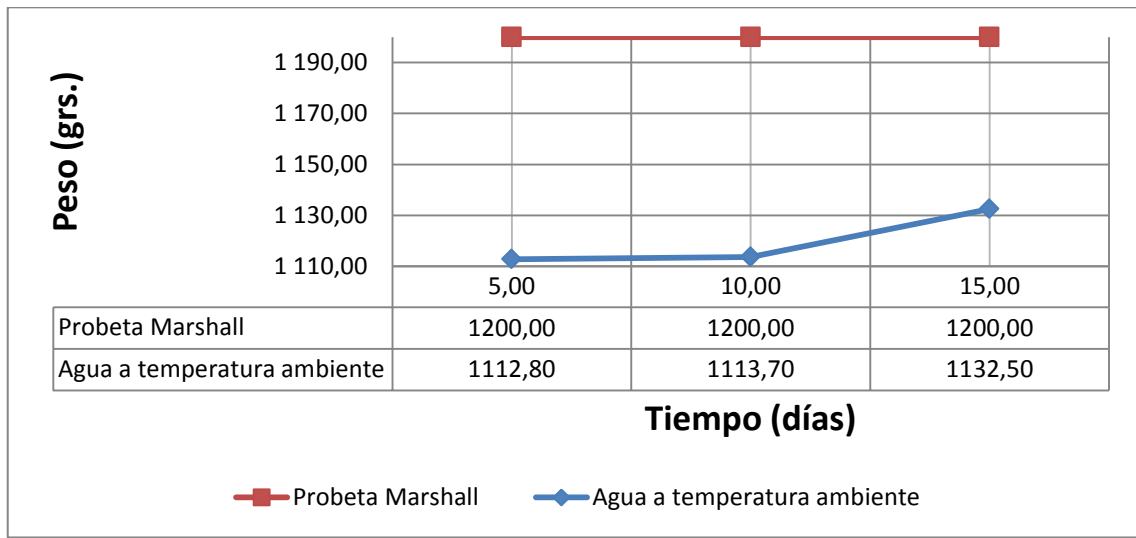
Figura 37. Deformaciones Marshall.



Fuente: Elaboración Propia.

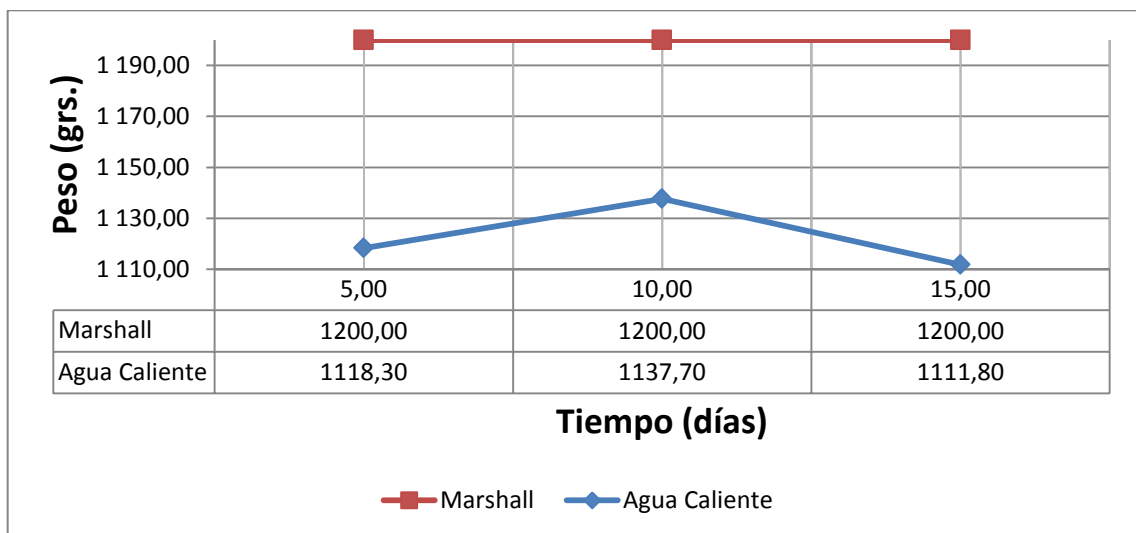
- Gráficas del MétodoCántabro

Figura 38. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua a temperatura ambiente.**



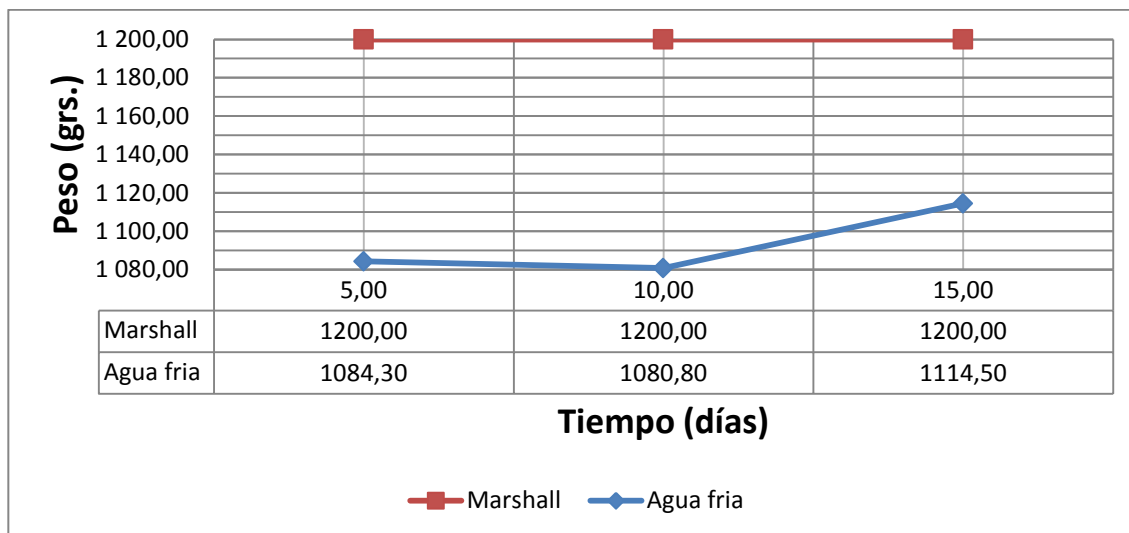
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua a temperatura de 60 °C.**



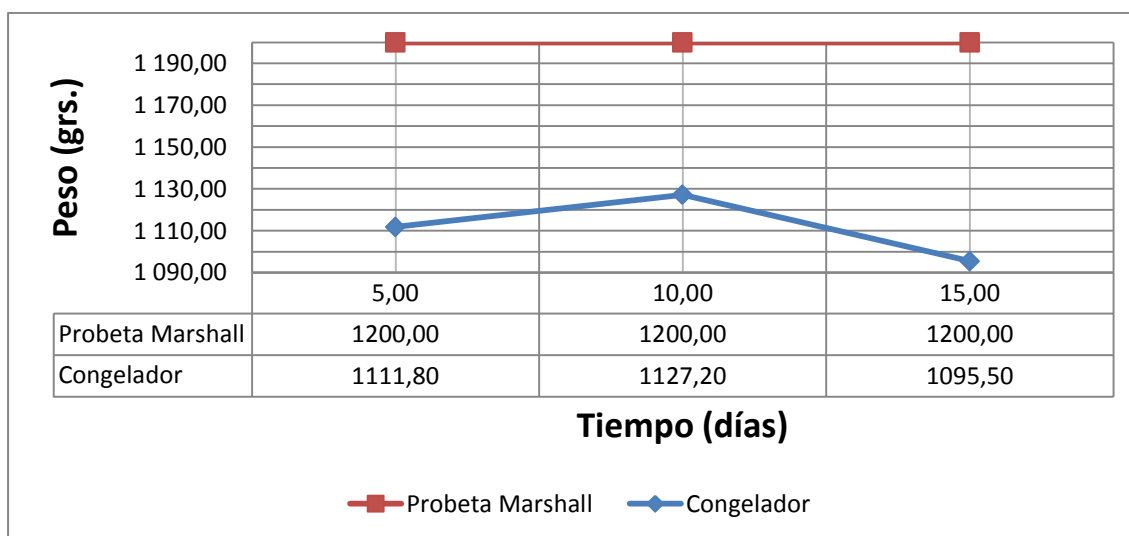
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua a temperatura de 10 °C.**



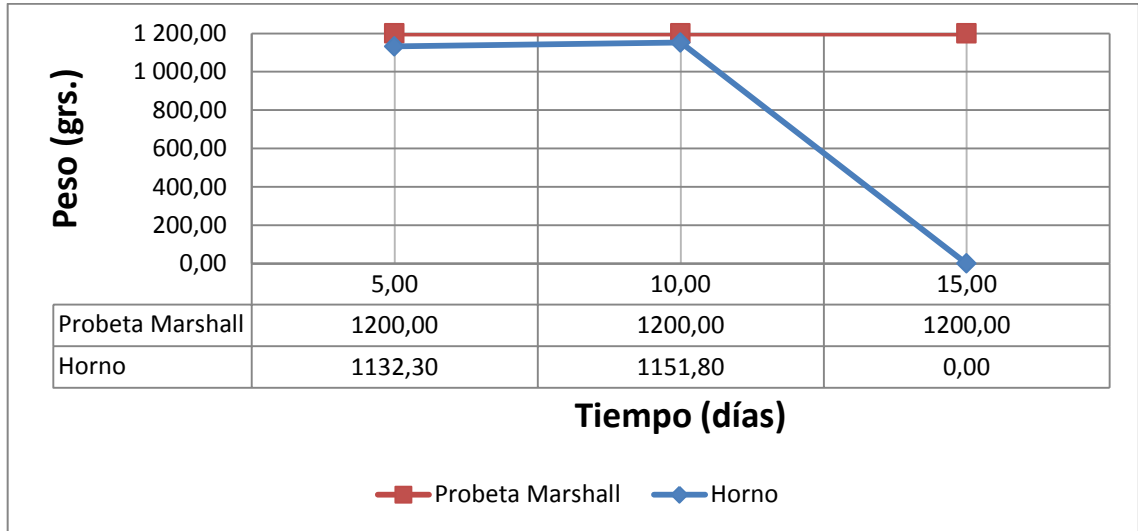
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta en congelador a temperatura de - 3°C.**



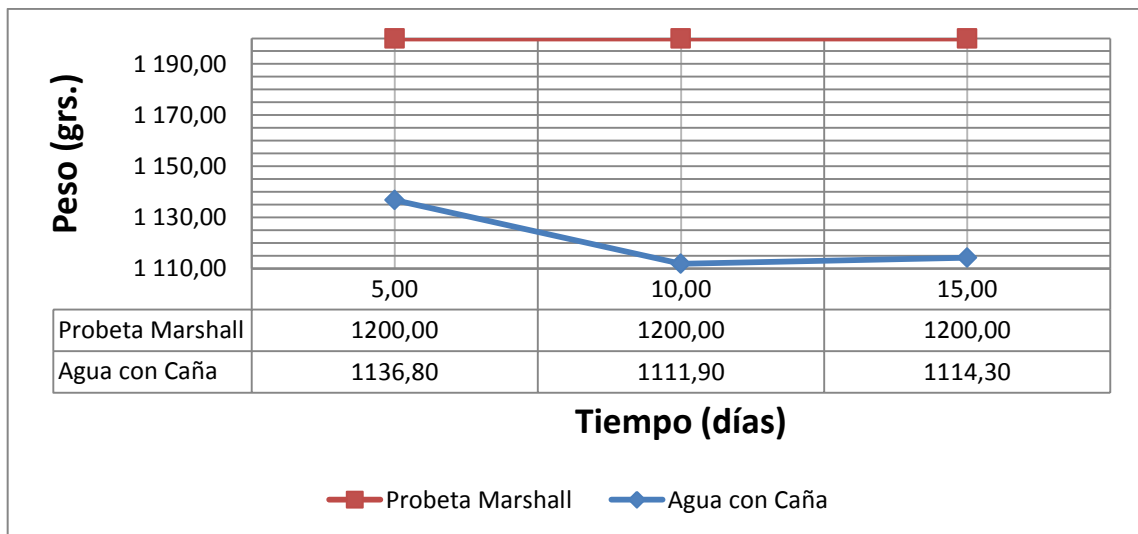
Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta en horno a temperatura de 100 °C.**



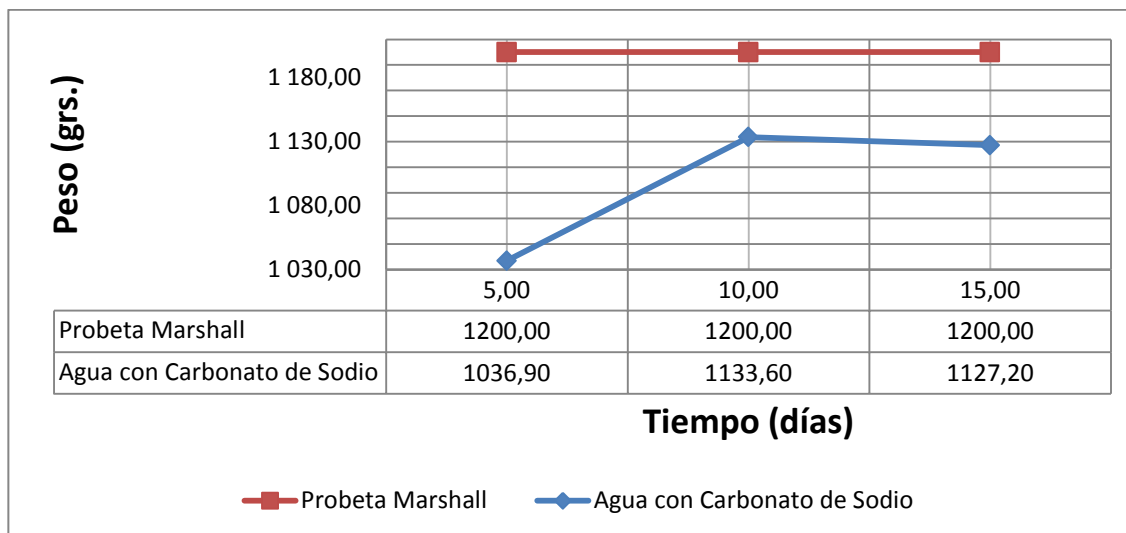
Fuente: Elaboración propia.

Figura 43. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua con caña.**



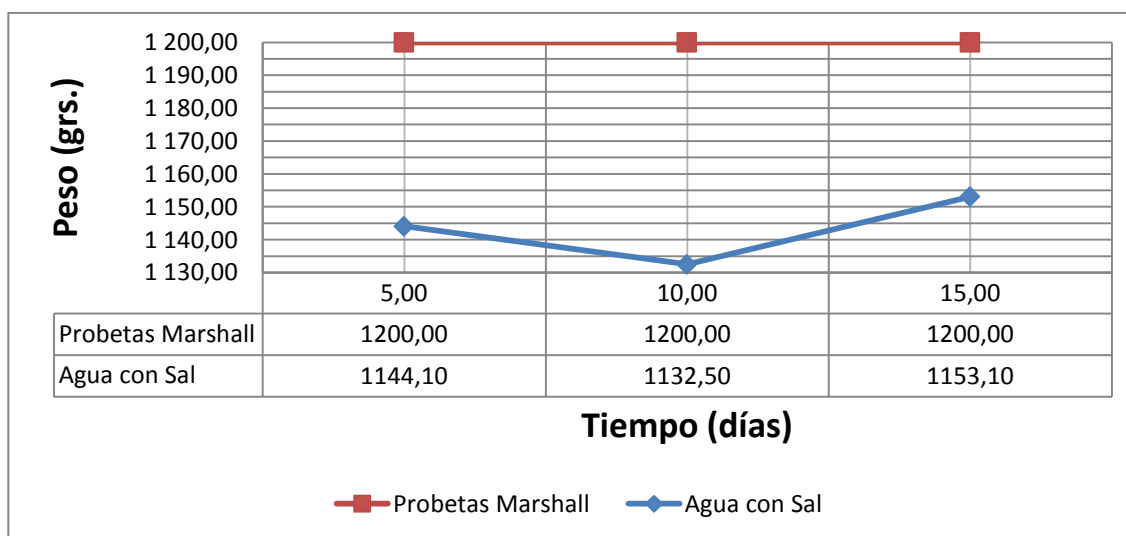
Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua con carbonato de sodio.**



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. **Desgaste por el Método de Cántabro, probeta Marshallvs. probeta de agua con sal.**



Fuente: Elaboración propia.

Tabla XIII. **Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del EnsayoCántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de cinco días.**

Probeta	Masa Inicial (GRS.)	Masa Final (GRS.)	P1 - P2	$\frac{(P1 - P2)}{P1}$	Pérdida del Desgaste en %
Agua a temperatura ambiente	1179,72	1 112,80	66,92	0,06	5,67
Agua a temperaturade 60 °C	1205,53	1118,30	87,23	0,07	7,24
Agua a temperatura de 10 °C	1 176,07	1 084,30	91,77	0,08	7,80
Congelador a temperatura de-3°C	1194,05	1111,80	82,25	0,07	6,89
Horno a temperatura de 100°C	1 182,30	1 132,30	50,00	0,04	4,23
Agua con Caña,con una relación 1 : 1	1201,40	1136,80	64,60	0,05	5,38
Agua con Carbonato de Sodio, Molar 1 (106 grs. / litro)	1 190,62	1 036,90	153,72	0,13	12,91
Agua con Sal, (35 grs. / litro)	1205,49	1144,10	61,39	0,05	5,09

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XIV. **Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo Cántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de diez días.**

Probeta	Masa Inicial (GRS.)	Masa Final (GRS.)	P1 - P2	$\frac{(P1 - P2)}{P1}$	Pérdida del Desgaste en %
Agua a temperatura ambiente	1179,30	1 113,70	65,60	0,06	5,56
Agua a temperatura de 60 °C	1 202,55	1137,70	64,85	0,05	5,39
Agua a temperatura de 10 °C	1224,85	1 080,80	144,05	0,12	11,76
Congelador a temperatura de -3°C	1 202,94	1127,20	75,74	0,06	6,30
Horno a temperatura de 100°C	1199,54	1 151,80	47,74	0,04	3,98
Agua con Caña, con una relación 1 : 1	1 191,20	1111,90	79,30	0,07	6,66
Agua con Carbonato de Sodio, Molar 1 (106 grs. / litro)	1192,91	1 133,60	59,31	0,05	4,97
Agua con Sal, (35 grs. / litro)	1 183,99	1132,50	51,49	0,04	4,35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XV. **Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del EnsayoCántabro de Pérdidas por Desgaste (NLT - 352/00), para un tiempo de quince días.**

Probeta	Masa Inicial (GRS.)	Masa Final (GRS.)	P1 - P2	$\frac{(P1 - P2)}{P1}$	Pérdida del Desgaste en %
Agua a temperatura ambiente	1190,49	1 132,50	57,99	0,05	4,87
Agua a temperaturade 60 °C	1 195,21	1111,80	83,41	0,07	6,98
Agua a temperaturade 10 °C	1214,06	1 114,50	99,56	0,08	8,20
Congelador a temperaturade -3°C	1 190,57	1095,50	95,07	0,08	7,99
Horno a temperaturade 100°C	1000,00	0,00	1000,00	1,00	100,00
Agua con Caña, con unarelación 1 : 1	1 185,18	1114,30	70,88	0,06	5,98
Agua con Carbonato de Sodio, Molar 1 (106 grs. / litro)	1207,84	1 127,20	80,64	0,07	6,68
Agua con Sal, (35 grs. / litro)	1 207,84	1153,10	54,74	0,05	4,53

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Análisis de resultados

4.5.1. Resultados Ensayo Marshall

Relación de estabilidad y fluencia, es la relación que resulta al dividir el valor de estabilidad dentro del valor de flujo, lo cual indica la proporción por centésima de pulgada que se deforma la probeta para la carga aplicada; en otras palabras nos indica la resistencia por centésima de pulgada que tendrá la mezcla asfáltica; debiendo estar entre los parámetros de 120 y 275 (lb/0,01pulg.).

Tabla XVI. **Relación estabilidad y fluencia de probeta Marshall**

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Marshall	2 776,31	17	163,31
	2 682,00	15	178,80
	2 842,42	13	218,65

Fuente: Elaboración propia.

Contamos con una mezcla de referencia relativamente plástica ya que sus resultados en la fluencia lanzan resultados altos, pero con relaciones Estabilidad/flujo, dentro de los parámetros establecidos, los cuales sí cumplen.

Tabla XVII. **Relación estabilidad y fluencia de probeta en agua a temperatura ambiente.**

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua a temperatura ambiente	1 046,20	15	69,75
	2 748,10	10	274,81
	2 512,37	15	167,49

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta sumergida en agua a una temperatura ambiente, se logra apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con una estabilidad Marshall por debajo de los 1200 lbs. y un flujo mayor a los 14 (0,01pulg.), esto nos indica que la mezcla paso a un estado muy plástico, esto con lleva a posibles apariciones de ahuellamientos.

Tabla XVIII. **Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua a una temperatura de 60 °C.**

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua a temperatura de 60 °C	2 850,75	10	285,08
	2 954,55	15	196,97
	2 888,63	18	160,48

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta sumergida en agua a una temperatura de 60 °C, se logra apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con una estabilidad Marshall alta contra un flujo bajo, lo cual indica de una mezcla frágil y rígida, esto nos con

lleva a la aparición de fisuras, al paso del tiempo el flujo comienza a aumentar conservando la estabilidad Marshall, esto nos indica que la mezcla comienza a pasar a un estado más plástico.

Tabla XIX. Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua a una temperatura de 10 °C.

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua a temperatura de 10 °C	2 795,26	16	174,70
	4 043,39	23	175,80
	2 842,42	18	157,91

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta sumergida en agua a una temperatura de 10 °C, se logra apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con una estabilidad Marshall alta y un flujo bajo, relacionado con la muestra Marshall de referencia, esto nos indica de una mezcla frágil y rígida, esto con lleva a la aparición de fisuras.

Tabla XX. Relación estabilidad y fluencia de probeta en Congelador a una temperatura de - 3 °C.

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Congelador a temperatura de -3°C	3 968,82	25	158,75
	3 921,65	18	217,87
	2 785,79	30	92,86

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta introducida a un congelador a una temperatura de -3 °C, logramos apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con una estabilidad Marshall alta, esto nos indica de una mezcla demasiado rígida y frágil, la cual con lleva a la aparición de fisuras.

Tabla XXI. Relación de estabilidad y fluencia de probeta en Horno a una temperatura de 100 °C.

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Horno a temperatura de 100°C	2 776,31	24	115,68
	4 296,22	15	286,41
	2 888,64	35	82,53

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta introducida a un horno a una temperatura de 100 °C, se logra apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con un flujo alto, lo cual nos indica de una mezcla demasiado plástica, la cual con lleva a la aparición de ahuellamientos, con el pasar del tiempo la mezcla se vuelve sumamente plástica.

Tabla XXII. Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Caña.

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua con Caña	2 888,63	20	144,43
	2 935,80	20	146,79
	3 387,70	25	135,51

Fuente: Elaboración propia.

En la probeta sumergida en agua con caña de azúcar, logramos apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con un flujo alto, con referencia a Marshall de referencia, esto nos indica que con el paso del tiempo la mezcla sumergida en agua con caña de azúcar se comporta sumamente plástica, esto con lleva a ahuellamientos al paso del transporte.

Tabla XXIII. **Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Carbonato de Sodio.**

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua con Carbonato de Sodio	2 850,75	15	190,05
	3 387,70	10	338,77
	2 644,31	8	330,54

Fuente: Elaboración propia.

Con la probeta sumergida en agua con carbonato de sodio, se logra apreciar que la mezcla asfáltica, comienza con una estabilidad Marshall alta con referencia al Marshall referencia, esto nos indica que con el paso del tiempo se comportara de una manera frágil y rígida, conllevando el aparecimiento de fisuras.

Tabla XXIV. **Relación estabilidad y fluencia de probeta en Agua con Sal.**

	Estabilidad (lb.)	Flujo (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Flujo (lb./0,01 pulg.)
Agua con Sal	2 276,30	9	252,92
	3 405,54	14	243,25
	3 077,28	18	170,96

Fuente: Elaboración propia.

Con la probeta sumergida en agua con sal, logramos apreciar que la mezcla asfáltica, tiene una estabilidad Marshall alta y un flujo demasiado bajo, lo cual nos indica que la mezcla asfáltica es demasiado frágil y rígida, esto con lleva a la aparición de fisuras.

5.5.2. Resultados Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste

Este Ensayo nos permite valorar empíricamente la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico, considerado también como un Ensayo visual y comparativo.

Tabla XXV. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura ambiente.**

Probeta	
Agua (Temperatura Ambiente)	% Desgaste
Cinco días	5,67
Diez Días	5,56
Quince Días	4,87

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXVI. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura de 60 °C.**

Probeta	
Agua a Temperatura = 60 °C	% Desgaste
Cinco días	7,24
Diez Días	5,39
Quince Días	6,98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXVII. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua a temperatura de 10 °C.**

Probeta	
Agua a Temperatura = 10 °C	% Desgaste
Cinco días	7,80
Diez Días	11,76
Quince Días	8,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en congelador a temperatura de - 3°C.**

Probeta	
Congelador (Temperatura = -3°C)	% Desgaste
Cinco días	6,39
Diez Días	6,30
Quince Días	7,99

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXIX. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en horno a temperatura de 100°C.**

Probeta	
Horno (Temperatura = 100°C)	% Desgaste
Cinco días	4,23
Diez Días	3,98
Quince Días	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXX. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en agua con caña.**

Probeta	
Agua con Caña (Relación 1 : 1)	% Desgaste
Cinco días	5,38
Diez Días	6,66
Quince Días	5,98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXXI. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua con Carbonato de Sodio.**

Probeta	
Agua con Carbonato de Sodio (Molar 1, 106 grs. / litro)	% Desgaste
Cinco días	12,91
Diez Días	4,97
Quince Días	6,68

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXXII. **Valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste a la probeta en Agua con Sal**

Probeta	
Agua con Sal (Agua de mar, 35 grs. / litro)	% Desgaste
Cinco días	5,09
Diez Días	4,35
Quince Días	4,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XXXIII. Comparación de valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre Agua a temperatura ambiente, Agua a temperatura de 60 °C y Agua a temperatura de 10 °C

Probeta	Cinco Días	Diez Días	Quince Días
Agua a Temperatura Ambiente	5,67	5,56	4,87
Agua a Temperatura de 60 °C	7,24	5,39	6,98
Agua a Temperatura de 10 °C	7,80	11,76	8,20

Fuente: Elaboración propia.

Tomando de referencia base, la probeta en agua a temperatura ambiente, para lograr observar en qué afecta la temperatura del agua a la probeta. Ambas probetas tienen un Desgaste mayor del 7% a los primeros cinco días, indicando que ambos ligantes se vuelven rígidos, a los diez días la probeta sumergida a una temperatura de 10 °C demuestra un ligante con características mecánicas más rígidas que la sumergida a una temperatura de 60 °C.

Tomamos las temperaturas de 10 °C y 60 °C, porque son las temperaturas en las cuales trabaja el asfalto virgen en condiciones naturales de servicio, con esto logramos observar que, a menor temperatura, los ligantes se vuelven más rígidos por ende más frágiles que los ligantes a mayores temperaturas, estos son más plásticos.

Entonces, debido a lo dicho precedente a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de las mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a

altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

Tabla XXXIV. Comparación de los valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre Agua a temperatura ambiente, Agua con Caña, Agua con Carbonato de Sodio y Agua con Sal

Probeta	Cinco Días	Diez Días	Quince Días
Agua a Temperatura Ambiente	5,67	5,56	4,87
Agua con Caña	5,38	6,66	5,98
Agua con Carbonato de Sodio	12,91	4,97	6,68
Agua con Sal	5,09	4,35	4,53

Fuente: Elaboración propia.

Tomando de referencia base, la probeta en Agua a Temperatura ambiente, para así lograr observar en que afecta la presencia de sustancias (caña de azúcar, el carbonato de sodio y la sal), los primeros cinco días logramos apreciar que la probeta sumergida en agua con Carbonato de Sodio logra un mayor Desgastes que todas las demás, esto demostrando que la presencia de sulfatos en el agua logra que las características mecánicas del ligante sea sumamente rígido volviéndolo sumamente frágil, en cambio con la presencia de la sal y la caña de azúcar (sacarosa) los ligantes tienden a tener propiedades mecánicas más elásticas, con lo cual nos lleva a probetas con menos desgaste.

Tabla XXXV. Comparación de los valores obtenidos por medio del Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste, entre congelador a una temperatura de -3 °C y Horno a una temperatura de 100 °C.

Probeta	Cinco Días	Diez Días	Quince Días
Congelador a una temperatura de -3°C	6,39	6,30	7,99
Horno a una temperatura de 100°C	4,23	3,98	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Exponiendo una mezcla asfáltica virgen a temperaturas extremas, logramos apreciar que a bajas temperaturas de servicio, las propiedades mecánicas del ligante tienden a ser cada vez más rígidas por ende más frágiles, esto queda demostrado debido a que a mayor tiempo expuesto a bajas temperaturas el Desgaste tiende a ser mayor, mientras que a altas temperaturas de servicio, logramos observar que el Desgaste es menor debido a las propiedades mecánicas de ligante tienden a ser cada vez mas elásticas, hasta llegar a un punto en el cual el ligante pierde la capacidad de regresar a su forma.

CONCLUSIONES

1. En general, el envejecimiento se produce por la incidencia de las variables ambientales o externas del medio donde se encuentra el pavimento flexible; en un corto tiempo de envejecimiento logramos determinar que en los ambientes expuestos a grandes concentraciones de sal y agua (Agua de mar e inundaciones) la estabilidad desciende al igual que el flujo, esto nos indica que las mezclas asfálticas tienden a volverse más rígidas, menos dúctiles.
2. Las mezclas expuestas a ambientes donde las temperaturas son mayores a lo habitual, con el paso del tiempo las mezclas bituminosas comienzan a ser más blandas, pierden sus características elásticas terminando en deformaciones, las cuales la mezcla asfáltica no logra recuperar.
3. Con las mezclas expuestas a ambientes donde las temperaturas son más bajas de lo habitual, logramos registrar que las mezclas asfálticas se comportan menos dúctiles, dando paso a las fisuras por las contracciones térmicas.
4. Con el Ensayo de Desgaste de Cántabro, logramos apreciar que el mayor Desgaste se obtiene cuando la mezcla es expuesta a agua fría, obviando que la muestra que permaneció en el horno por quince días a una temperatura de cien grados centígrados se desintegró.

5. En el Ensayo de Desgaste de Cántabro, logramos apreciar que en lugares donde la muestra fue expuesta a agua fría sufrió mayor Desgaste que en agua caliente; también que en ambientes secos a bajas temperaturas los materiales tienden a desgastarse más que los expuestos a ambientes secos a altas temperaturas, y en ambientes expuestos a diferentes agentes como lo son: La caña de azúcar, los Sulfatos y las sales marinas; de las anteriores mezclas asfálticas las expuestas a Sulfatos sufren mayor Desgaste y los de menor Desgaste son lo expuestos a las sales marinas.
6. Las mezclas expuestas a inundaciones continuas, son las mezclas que mas desgaste alcanzan en su vida de servicio; estas mezclas mantienen estabilidades Marshall altas y flujos bajo, lo cual conlleva a mezclas demasiado frágiles y rígidas.
7. A altas temperaturas de servicio, el ligante llega a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla; por otro lado, a temperatura de servicio bajas, el ligante de vuelve relativamente rígido y pierde el poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible a fisuras.
8. Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativas en su comportamiento.

RECOMENDACIONES

1. En probetas sumergidas en agua a temperatura ambiente, se logra apreciar que las propiedades mecánicas del ligante tienden a ser elásticas, con el paso del tiempo el ligante comienza a perder su propiedad elástica, perdiendo así la adherencia con el agregado. Para evitar estas situaciones es recomendable controlar la calidad de impermeabilidad del bitumen, para lograr un porcentaje de vacíos óptimos para la mezcla asfáltica y así evitar la filtración en estos vacíos.
2. A altas temperaturas de servicio, puede que el ligante llegue a reblandecerse, se recomienda aumentar la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.
3. A temperaturas de servicios bajas, se recomienda disminuir la dureza del asfalto, para minimizar el riesgo del fallo por fragilidad.
4. Es recomendable la aplicación de un modificador del asfalto con polímeros para que las características del ligante cumplan con los requerimientos de servicio del concreto asfáltico.
5. La presencia de la caña de azúcar (Sacarosa) en el ligante, permite que las mezclas asfálticas aumenten sus características elásticas, puede ser utilizado como un polímero natural en mezclas rígidas, en climas fríos ayudando a reducir la rigidez.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO. *American society for testing and materials*. Estados Unidos de América: T 164 - 05, T 166 - 05, T 209 - 05, T 269 - 03, T 245 - 04, T 030 - 03.
2. AFANASIEVA, N., ÁLVAREZ, M., ORTÍZ, M. *Rheologica ICharacterization of Aged Asphalt., Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 2, No.3, 2002, p.121-134.
3. AIREY, G. D., RAHIMZADEH, B., *Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties., Construction and Building Materials*, Vol. 18, 2004, p. 535-548.
4. ASTM. *Book of Standards. Standard specification for concrete aggregates*. Estados Unidos de América: D 2172 - 01, D 2726 - 00, D 2041 - 00, D 3203 - 00.
5. BAHIA ,H., ZHAI, H., RANGEL, A., *Evaluation of stability, nature of modifier, and short-term aging of modified binders using new test: LAST, PAT, and modified TFOT., Transportation Research Record 1638*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1998 p. 64-71.
6. BELL, Ch. A., *Aging of Asphalt-Aggregate Systems. SHRP A-305. Strategic Highway Research Program.*, National Research Council, Washington, D.C. 1989.

7. CARRANZA Reyes, Vicente Eduardo, *Tipos de modificadores polímeros a utilizar de acuerdo con exigencias de clima, compatibilidad de materiales (agregados) y tipos de mezcla asfáltica, para aplicación en carreteras principales en el departamento de Guatemala*, Guatemala, Universidad de San Carlos, Febrero de 2011, Ingeniería Civil.
8. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, Guatemala, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2000.
9. DOW, A. W., *Asphalt Experiments at Washington*. Engineering Record, Vol. 47, No. 18, 1903.
10. EDLER, A. C., *Use of Aging Test to Determine the Efficacy of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding its Oxidative Hardening.*, Proceeding, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, 1985, p. 118-139.
11. *Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas* (en línea).
<http://es.scribd.com/doc/112503071/Envejecimiento-de-asfaltos-y-mezclas-asfalticas#scribd>. (Consulta: 07 de diciembre de 2016).
12. GARCÍA Melo, Weimar, *Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente*, Colombia, Universidad nacional de Colombia, 2013.

13. GLOVER, J., DAVISON, R., R., VASSILIEV, N., *New look for asphalt aging device.*, *Texas Transportation, Researcher*, Vol.39, No. 1, 2003, p. 15-19.
14. HUMMARD, P., GOLLOMB, H., *The Hardening of Asphalt with Relation to Development of Cracks in Asphalt Pavements.*, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists* Vol.9, 1937, p. 165-194.
15. INV. Instituto nacional de vías. *Normas de Ensayos de materiales para carretera.* República de Colombia. E - 732 - 07, E - 733 - 07, E 735 - 07, E - 736 - 07, E 748 - 07, E - 782 - 07.
16. LEÓN Fajardo, José Luis, *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*, Guatemala, Universidad de San Carlos, Octubre de 1996, Ingeniería Civil.
17. LESUEUR, D., *La Rhéologie des Bitumes: Principes et Modification.*, *Rhéologie*, Vol. 2, 2002, p. 1-30.
18. LICONA Jiménez, Miguel José, *Manual de laboratorista de asfaltos en construcción de carreteras*, Guatemala, Universidad de San Carlos, Julio de 1969, Ingeniería Civil.
19. LU,X., ISACSSON, U., *Effect of ageing on bitumen chemistry and Rheology.*, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, 2002, p. 15-22.

20. NAVARRO, F., PARTAL, P., MARTÍNEZ-BOZA, F., GALLEGOS, C., *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens.*, *Fuel*, Vol. 83, 2004, p. 2041-2049.
21. PETERSEN, J., C., *A thin-Rim Accelerated Aging Test for Evaluating Asphalt Oxidative Aging.*, *Proceeding*, Association of Asphalt Paving Technologists, Preprint Volume, 1989.
22. PLANCHER, H., GREEN, E. L., PETERSON, J. C., *Reduction of Oxidative Hardening of Asphalt by Treatment with Hydrated Ume-A Mechanistic Study.*, *Proceeding*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 45, 1976, p.1-24.
23. QUINTERO Franco, Juan David y García Mesa, Helber. *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tipo MD - 2 sometidas al efecto del envejecimiento adicionadas con cal y/o cemento.* Medellín, Colombia.
24. RUAN, Y., DAVISON, R., R., GLOVER, C., J., *The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts.*, *Fuel*, Vol. 82, No.14, 2003, p. 1763.1773.
25. SIRIN, O., TIA, M., RUTH, B., *Evaluation of an improved Rotavapor aging apparatus using a Morton flask for simulation of hot-mixing on modified asphalts.*, Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. 2000.
26. TIA, M., RUTH, B. E., CHARAI, C. T., SHIAU, J. M., RICHARDSON, D., WILLIAMS, J., *Investigation of Original and In-Service Asphalt*

Properties for the Development of Improved Specifications- Final Phase of Testing and Analysis., Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida, Gainesville, FL, 1998.

27. THURSTON, R. R., Knowles, E. C., *Asphalt and its Constituents. Oxidation at service Temperatures.*, Ind. Eng. Chem. Vol. 33 No. 3, 1941, p. 320-324.
28. TRAXLER, R. N., *Durability of Asphalt Cements.*, *Proceedings*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 32, 1963, p. 44-58.
29. VARGAS, X. A., *Determinación de la evolución reológica de las fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento in situ en un reo-reactor.*, Tesis presentada a la Universidad Industrial de Santander para optar el título de Doctor en Ingeniería Química, 2007.
30. VELÁZQUEZ Mayen, Josué Ariel, *Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezclas asfálticas en caliente modificada con polímeros*, Guatemala, Universidad de San Carlos, Septiembre de 2016, Tesis, Ingeniería Civil.
31. WELBOM, J. Y., *Relationship of Asphalt Cement Properties to Pavement Durability.*, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis 59 Washington, D.C. 1979.

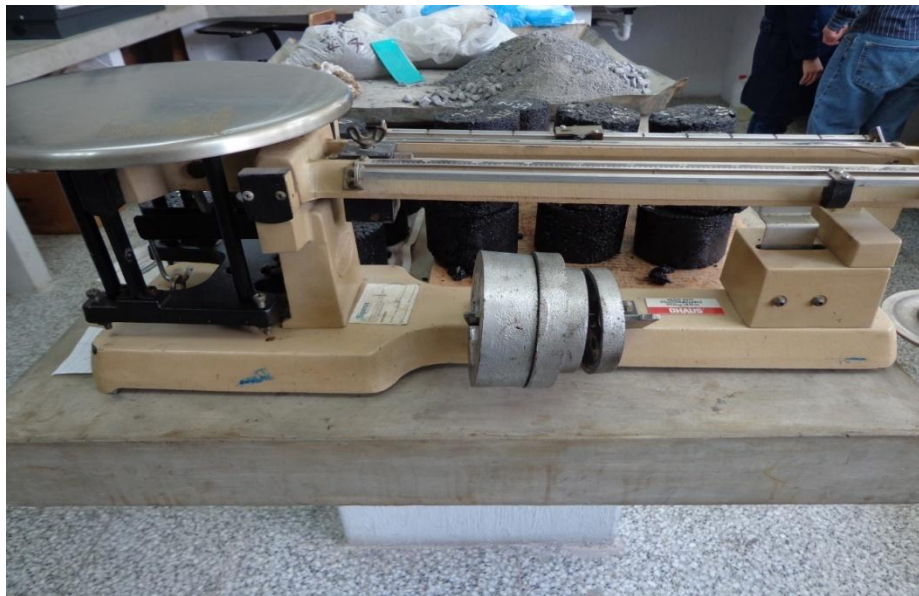
APÉNDICES

Apéndice 1. Balanza digital, utilizada para pesar los agregados y diversas sustancias.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de Ingeniería, USAC y Laboratorio del Ingeniero Alvaro Guillermo

Apéndice 2. Pesa, utilizada para pesar los agregados y diversas sustancias.



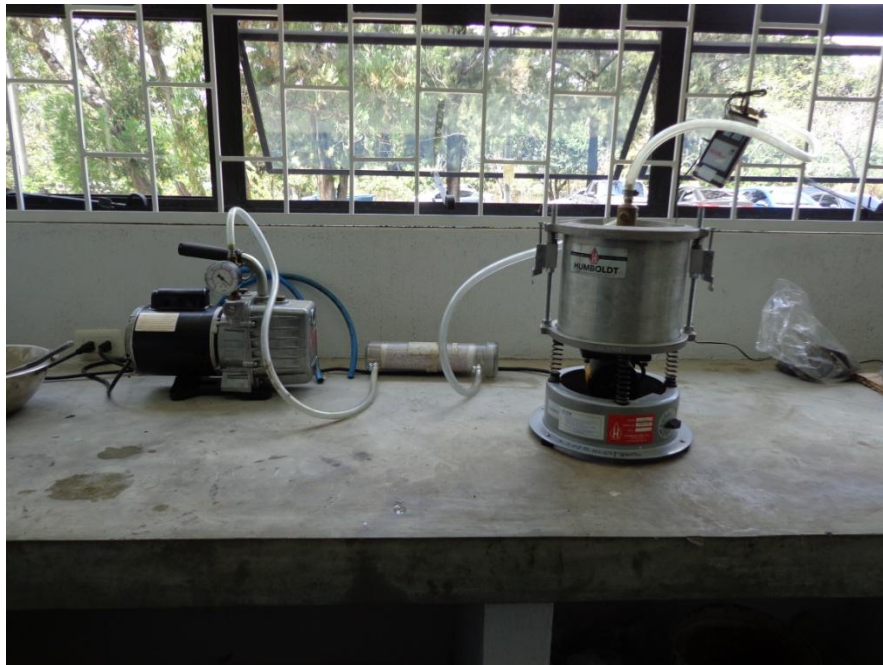
Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. Vernier, utilizado para medidas de probetas.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. Picnómetro de vacíos, utilizado para Ensayo de Gravedad específica teórica máxima, Rice



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5. Horno, utilizado para calentar agregados, mezclas asfálticas.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 6. Máquina de los ángeles, utilizada para el Ensayo de Cántabro de Pérdidas por Desgaste..



Fuente: Laboratorio del Ingeniero Álvaro Guillermo

Apéndice 7. Caña de azúcar utilizada en el Ensayo en la mezcla asfáltica expuesta a la mezcla de agua con caña de azúcar.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de ingeniería, USAC.

Apéndice 8. Comparación visual de probetas ensayadas por el Método de Cántabro.



Fuente: Laboratorio del Ingeniero Álvaro Guillermo.

Apéndice 9. Probetas sumergidas en Agua con caña.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de ingeniería, USAC.

Apéndice 10. Pileta donde fueron sumergidas las probetas para los pertinentes Ensayos.



Fuente: Laboratorio de asfaltos, CII, Facultad de ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Estabilidad y flujo Marshall ASTM D 1559.



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



No. 09523

INFORME NUMERO: 014 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36723

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO - 200312818

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
M1-5	2776,31	17
M2-10	2682,00	15
M3-15	2842,42	13
A-5	1046,20	15
A-10	2748,10	10
A-15	2512,37	15
AC-5	2850,75	10
AC-10	2954,55	15
AC-15	2888,63	18
AF-5	2795,26	16
AF-10	4043,39	23
AF-15	2842,42	18
C-5	3968,82	25
C-10	3921,65	18
C-15	2785,79	30
H-5	2776,31	24
H-10	4296,22	15
H-15	2888,64	35
AN-5	2888,63	20
AN-10	2935,80	20
AN-15	3387,70	25

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quironez de la Cruz
DIRECTOR CI/USAC





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

Anexo 2. Estabilidad y flujo Marshall ASTM D 1559



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



No. 09524

INFORME NUMERO: 015 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36723

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO - 200312818

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
AS-5	2850,75	15
AS-10	3387,70	10
AS-15	2644,31	8
ASAL-5	2276,30	9
ASAL-10	3405,54	14
ASAL-15	3077,28	18

Atentamente,

Vo. Bo. :



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






Ing. Danilo Francisco Luján Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos




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

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

Anexo 3. Densidad específica de bulk ASTM 2726-05a.



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



INFORME NUMERO: 016 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 36723

No. 09525

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO - 200312818

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

DISEÑO 1

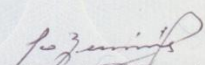
PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
M1	2,31
M2	2,34
M3	3,32
A1	2,30
A2	2,31
A3	2,35
A4	2,35
A5	2,33
A6	2,33
AC1	2,34

DISEÑO 2


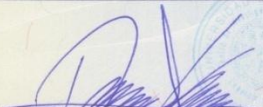
PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
AC2	2,33
AC3	2,40
AC4	2,37
AC5	2,36
AC6	2,35
AF1	2,35
AF2	2,36
AF3	2,36
AF4	2,31
AF5	3,36

Atentamente,

Vo. Bo. :



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

Ing. Denis Francisco Lucas Mazanegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

Anexo 4. Densidad específica de bulk ASTM 2726-05a.



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



INFORME NUMERO: 017 L.B.A ORDEN DE TRABAJO: 36723 No. **09526**

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO - 200312818

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

DISEÑO 1

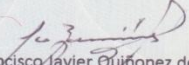
PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
AF6	2,38
C1	2,37
C2	2,34
C3	2,37
C4	2,38
C5	2,27
C6	2,31
H1	2,32
H2	2,37
H3	2,37

DISEÑO 2

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
H4	2,31
H5	2,24
H6	2,38
AÑ1	2,37
AÑ2	2,36
AÑ3	2,37
AÑ4	2,36
AÑ5	2,36
AÑ6	2,39
AS1	2,35

Atentamente,

Vo. Bo. :



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




Ing. Darío Francisco Luján Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

Anexo 5. Densidad específica de bulk ASTM 2726-05a.



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



INFORME NUMERO: 018 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 36723

No. 09527

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO - 200312818

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

DISEÑO 1

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
AS2	2,29
AS3	2,32
AS4	2,39
AS5	2,37
AS6	2,34
ASAL1	2,37
ASAL2	2,33
ASAL3	2,39
ASAL4	2,39
ASAL5	2,37

DISEÑO 2

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
ASAL 6	2,36

Atentamente,

Vo. Bo. :

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



[Signature]
Ing. Darío Francisco Lucas Mezariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

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

Anexo 6. Densidad específica teórica máxima "RICE" ASTM 2041.

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

INFORME NUMERO: 019 L.B.A. ORDEN DE TRABAJO: 36723 No. **09528**

INTERESADO: ROBERTO YOSHIKI TANIMOTO MORENO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION INGENIERIA CIVIL: ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS
ASFALTICAS, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 18 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: 1 CUBETA DE MEZCLA ASFALTICA PARA ENSAYOS

PROBETA	GMM
1	2,480
2	2,510

Atentamente,

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


Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos 

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

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