



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ANÁLISIS REOLÓGICO DEL ASFALTO PRODUCIDO EN LAS
CINCO REFINERÍAS MÁS IMPORTANTES EN MÉXICO

TIPO DE TRABAJO:

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JUAN CARLOS SANDOVAL MARTÍN DEL CAMPO

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

CO-ASESOR:

M.I. NOÉ HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ



MORELIA, MICHOACÁN

MAYO 2017

Dedicatoria

Con dedicatoria...

A mi Papá, a mi Mamá y a mi Hermana...

*Porque nos queremos,
porque nos cuidamos,
porque estamos juntos
nada es complicado.*

*Porque si estamos juntos,
entre todos formamos
este pequeño mundo
que familia llamamos.*

Agradecimientos

A mi asesor, Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por brindarme la oportunidad de ser parte de esta investigación llevada a cabo en la Universidad Nacional Autónoma de México y tener una nueva experiencia en la Ciudad de México. Además, por guiarme, por su tiempo y por aconsejarme en todo momento.

A mi Co-Aesor, M.I. Noé Hernández Fernández, por darme su amistad, apoyo, paciencia, tiempo y ayuda en cualquier instancia que lo necesitara. También por transmitirme su conocimiento y experiencia durante el tiempo de mi estancia.

A la Dra. Alexandra Ossa López por su aceptación para realizar las investigaciones del presente trabajo, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible. Así como a los trabajadores en el Laboratorio de Vías Terrestres, y al departamento del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNAM.

A Iván, por siempre tener ganas de trabajar y esforzarse en cada actividad realizada en el laboratorio y por el apoyo en cada momento difícil que se presentó a lo largo del tiempo en la estancia en la CDMX. También para Alfonso, por recibirnos con gusto, tu amistad y los buenos momentos que vivimos juntos.

A Gabo, Blancas, Imer, Luis, Julio, Fidel y todos mis amigos que fueron parte de mi durante la carrera. Gracias por su ayuda en los momentos adversos y consejos que me brindaron, ya que de cada uno de ustedes aprendí muchas cosas.

A Sofía, por ser una gran persona conmigo y estar presente en este proceso tan importante, por darme consejos, apoyo y por soportarme en cualquier situación. Gracias por darme tu cariño y motivación siempre.

A todos mis tíos, por siempre estar al pendiente de mí, y por brindarme momentos de alegría, contagiarme su entusiasmo y motivarme durante toda la universidad.

También por toda la confianza y apoyo que me proporcionaron, gracias por cada uno ser una parte pequeña de esta gran familia.

A mi hermana, por siempre poder contar contigo en cualquier situación y por transmitirme todas las cosas buenas que sabes. Muchas gracias por todas las experiencias y momentos que hemos vividos juntos, que algunos no hubieran sido posibles sin ti.

A mis padres, por ser mi inspiración y mi base de metas, por ser siempre fuertes, por su cariño, comprensión, apoyo, consejos, alegrías, amor y por estar conmigo en cada momento de mi vida. Muchas gracias por sus enseñanzas, sabiduría y principalmente por darme todo lo que soy ahora.

Índice General

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE GENERAL	IV
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
OBJETIVOS	3
Objetivo General	3
Objetivos particulares	3
1.0. ASFALTOS PARA PAVIMENTOS	4
1.1. Proceso de obtención del asfalto	4
1.2. Sistemas de clasificación de Asfaltos	6
1.2.1. Penetración	6
1.2.2. Viscosidad	7
1.2.3. Grado PG	9
1.3 Reología de los Asfaltos	10
1.3.1. Parámetros Reológicos	11
1.3.1.1. Asfalto Original	11
1.3.1.2. Asfalto Envejecido por el Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	12
1.3.1.3. Asfalto Envejecido por Pressurized Aging Vessel (PAV)	13
1.3.2. Curvas Maestras	14
1.3.2.1. Propiedades Evaluadas	16
1.3.2.2. Modelo Modificado de Havriliak-Negami	18

1.4 Envejecimiento en Asfaltos	22
1.4.1. Parámetros Empíricos (penetración, punto de reblandecimiento, etc.)	23
1.4.2. Modelos de Envejecimiento	24
1.4.2.1. Sistema de Envejecimiento Global	24
1.4.2.2. Procedimiento del Instituto de Investigaciones del Oeste	27
1.4.2.3. Metodología de Texas A&M	29
2.0. SELECCIÓN DE LOS ASFALTOS A ESTUDIAR Y PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA	36
2.1. Descripción y ubicación de los cinco Asfaltos utilizados	36
2.1.1. Refinería de Salamanca	36
2.1.2. Refinería de Tula	36
2.1.3. Refinería de Cadereyta	37
2.1.4. Refinería de Salina Cruz	38
2.1.5. Refinería de Altamira	38
2.2. Descripción de los procedimientos de prueba	40
2.2.1. DSR	40
2.2.2. Penetración	41
2.2.3. Punto de reblandecimiento	41
2.2.4. Viscosidad Rotacional	42
2.2.5. RTFOT	43
2.2.6. PAV	45
2.2.7. BBR	46
2.2.8. Espectrometría	47
3.0. ESTUDIO REOLÓGICO DE LOS ASFALTOS SELECCIONADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.1. Propiedades Físicas	49
3.1.1. Penetración	49
3.1.2. Punto de Reblandecimiento	50
3.1.3. Viscosidad Rotacional en Asfalto Original	53

3.1.4. Viscosidad Rotacional Después del RTFOT	54
3.1.5. Cambio de masa	56
3.2. Resultados Reológicos	58
3.2.1. Clasificación por Grado de Desempeño Original	58
3.2.2. Grado de Desempeño después del RTFOT	59
3.2.3. Grado de desempeño después de PAV	61
3.2.4. Caracterización por BBR	62
3.2.5. Curvas Maestras	64
3.2.5.1. Curvas Maestras del Asfalto Original	69
3.2.5.2. Curvas Maestras de los Asfaltos después del RTFOT	70
3.2.5.3. Curvas Maestras de los Asfaltos Después de PAV	72
3.3. Resultados del Infrarrojo FTIR	73
3.3.1 Espectros de los Asfaltos	73
3.3.1.1. Asfalto Proveniente de Altamira	73
3.3.1.2. Asfalto Proveniente de Cadereyta	74
3.3.1.3. Asfalto Proveniente de Salamanca	75
3.3.1.4. Asfalto Proveniente de Salina Cruz	76
3.3.1.5. Asfalto Proveniente de Tula	77
3.3.1.6. Asfaltos Provenientes de las Refinerías en Estudio	78
3.3.1.7. Asfaltos Después del RTFOT Provenientes de las Refinerías en Estudio	79
3.3.1.8. Asfaltos Después de PAV Provenientes de las Refinerías en Estudio	80
3.3.1.9. Asfaltos Después de PAV 40 horas Provenientes de las Refinerías en Estudio	81
3.3.2. Áreas y Picos de los Espectros	82
3.3.2.1. Asfalto Proveniente de Altamira	82
3.3.2.2. Asfalto Proveniente de Cadereyta	83
3.3.2.3. Asfalto Proveniente de Salamanca	84
3.3.2.4. Asfalto Proveniente de Salina Cruz	85
3.3.2.5. Asfalto Proveniente de Tula	86
3.3.2.6. Áreas de los Asfaltos en Estudio	87

3.4. Análisis de Resultados	89
3.4.1. Propiedades Físicas	89
3.4.1.1. Penetración	89
3.4.1.2. Punto de Reblandecimiento	90
3.4.1.3. Viscosidad Rotacional en el Asfalto Original	90
3.4.1.4. Viscosidad Rotacional Después del RTFOT	90
3.4.1.5. Cambio de Masa	91
3.4.2. Resultados Reológicos	91
3.4.3. Espectros de Infrarrojo FTIR	92
CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	99
 Anexo A. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio antes de ser sometidos a algún envejecimiento.	 99
Anexo B. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio sometidos al RTFOT.	108
Anexo C. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio sometidos por PAV.	117

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de refinación del petróleo para la producción de asfaltos, elaborado a partir de (7).	5
Figura 2. Aguja para prueba de penetración.	7
Figura 3. Tabla de Clasificación del asfalto según su penetración según la Norma D946/D946M-09 ^a .	7
Figura 4. Tabla de clasificación por viscosidad Norma ASTM D 3381/D3381M-13.	8
Figura 5. Tabla de clasificación por grado de desempeño en base a la Norma AASHTO M320.	10
Figura 6. Ejemplo de la caracterización del asfalto realizado para la Refinería de Tula para el asfalto original.	12
Figura 7. Parámetro que determina el grado de desempeño en la temperatura alta, Norma AASHTO M320.	12
Figura 8. Parámetro del RTFO determinado por su grado de desempeño, Norma AASHTO M320.	13
Figura 9. Parámetro de PAV determinado por su grado de desempeño, AASHTO MP-1.	14
Figura 10. Curva maestra de módulo complejo y ángulo de fase.	15
Figura 11. Relación entre $ G^* $, G' , G'' y δ	18
Figura 12. Ejemplo de medición de área del Sulfóxido.	30
Figura 13. Ejemplo de la Medición de la Velocidad Constante del Envejecimiento.	31
Figura 14. Gráfica que representa la ecuación de Arrhenius (4).	32
Figura 15. Ejemplo de Susceptibilidad al Endurecimiento (4).	33
Figura 16. Ubicación de la Refinería “Ing. Antonio M. Amor” en Salamanca.	36
Figura 17. Ubicación de la Refinería “Miguel Hidalgo” en Tula.	37
Figura 18. Ubicación de la Refinería “Ing. Héctor R. Lara Sosa” en Cadereyta.	37
Figura 19. Ubicación de la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime en Salina Cruz.	38
Figura 20. Ubicación de la Refinería Francisco I. Madero en Altamira.	39
Figura 21. Reómetro de Corte Dinámico (DSR), Bohlin Instruments.	40
Figura 22. Penetrómetro Universal utilizado para el asfalto.	41
Figura 23. Prueba de Punto de Reblandecimiento de anillo y bola.	42
Figura 24. Viscosímetro Rotacional, marca Fungilab.	43
Figura 25. Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), Despatch.	44
Figura 26. Contenedores con asfalto para el ensayo en el RTFO.	44
Figura 27. Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), compañía Applied Test Systems Inc.	45
Figura 28. Muestras después del RTFOT de las distintas Refinerías para someterlas a la prueba en el PAV.	46
Figura 29. Reómetro de Viga a Flexión (BBR), compañía Applied Test Systems Inc.	47
Figura 30. Molde y Viga para el ensayo de BBR.	47

Figura 31. Espectrómetro Thermo Nicolet 6700 FT-IR. _____	48
Figura 32. Resultados experimentales de la prueba de Penetración para los Asfaltos en Estudio. _____	50
Figura 33. Resultados experimentales de la prueba de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio. _____	51
Figura 34. Resultados Experimentales de la prueba 2 de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio. _____	52
Figura 35. Resultados experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Original de los Asfaltos en Estudio. _____	54
Figura 36. Resultados experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	56
Figura 37. Resultados del cambio de masa calculado para los Asfaltos en Estudio. _____	58
Figura 38. Resultados experimentales de la Clasificación por Grado de Desempeño del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio. _____	59
Figura 39. Resultados experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	60
Figura 40. Resultados experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	62
Figura 41. Resultados experimentales para la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	64
Figura 42. Curva Maestra $ G^* $ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta. _____	66
Figura 43. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta. _____	66
Figura 44. Curva Maestra $ G^* $ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira. _____	67
Figura 45. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira. _____	67
Figura 46. Curva Maestra $ G^* $ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula. _____	68
Figura 47. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula. _____	68
Figura 48. Curva Maestra $ G^* $ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca. _____	68
Figura 49. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca. _____	68
Figura 50. Curva Maestra $ G^* $ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz. _____	69
Figura 51. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz. _____	69
Figura 52. Curvas Maestras $ G^* $ del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio. _____	70
Figura 53. Curvas Maestras $ G^* $ del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	71
Figura 54. Curvas Maestras $ G^* $ del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	72
Figura 55. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira en sus distintos estados de envejecimiento. _____	74
Figura 56. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta en sus distintos estados de envejecimiento. _____	75

<i>Figura 57. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	76
<i>Figura 58. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	77
<i>Figura 59. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	78
<i>Figura 60. Espectros del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.</i>	79
<i>Figura 61. Espectros del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.</i>	80
<i>Figura 62. Espectros del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.</i>	81
<i>Figura 63. Espectros del Asfalto Envejecido por PAV a 40 horas para los Asfaltos en Estudio.</i>	82
<i>Figura 64. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	83
<i>Figura 65. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	84
<i>Figura 66. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	85
<i>Figura 67. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	86
<i>Figura 68. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula en sus distintos estados de envejecimiento.</i>	87
<i>Figura 69. Resultados del Área de los Asfaltos en Estudio en sus distintas estados de envejecimiento.</i>	88

Lista de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de los datos obtenidos de la Refinería de Tula para el asfalto original. _____	11
Tabla 2. Datos experimentales de la prueba de Penetración para los Asfaltos en Estudio. _____	50
Tabla 3. Datos experimentales de la prueba de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio. _____	51
Tabla 4. Datos experimentales de la prueba 2 de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio. _____	52
Tabla 5. Datos experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Original de los Asfaltos en Estudio. _____	53
Tabla 6. Datos experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	55
Tabla 7. Datos experimentales del peso de los vasos para calcular el cambio de masa. _____	57
Tabla 8. Datos calculados del cambio de masa para cada uno de los Asfaltos en Estudio. _____	57
Tabla 9. Datos experimentales de la Clasificación por Grado de Desempeño del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio. _____	58
Tabla 10. Datos experimentales del Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	60
Tabla 11. Datos experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	61
Tabla 12. Datos experimentales completos de la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	63
Tabla 13. Resumen de los datos experimentales para la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	63
Tabla 14. Coeficientes de ajuste del modelo MHN del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio. _____	70
Tabla 15. Coeficientes de ajuste del modelo MHN del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio. _____	71
Tabla 16. Coeficientes de ajuste del modelo MHN para el Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio. _____	73
Tabla 17. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula. _____	99
Tabla 18. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca. _____	99
Tabla 19. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta. _____	102
Tabla 20. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz. _____	102

<i>Tabla 21. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira.</i>	106
<i>Tabla 22. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Tula.</i>	108
<i>Tabla 23. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Salamanca.</i>	108
<i>Tabla 24. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Cadereyta.</i>	111
<i>Tabla 25. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Salina Cruz.</i>	111
<i>Tabla 26. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Altamira.</i>	115
<i>Tabla 27. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Tula.</i>	117
<i>Tabla 28. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Salamanca.</i>	117
<i>Tabla 29. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Cadereyta.</i>	120
<i>Tabla 30. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Salina Cruz.</i>	120
<i>Tabla 31. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Altamira.</i>	124

Resumen

El asfalto que se encuentra en México es proporcionado por las plantas de refinación que se dedican al procesamiento del petróleo producto de la refinación. El procedimiento de refinación que se lleva a cabo en las plantas ubicadas en distintos lugares de México, es teóricamente el mismo, lo cual se habla de la obtención de asfaltos con las mismas propiedades.

Este documento comprende una experimentación amplia de los distintos asfaltos que se producen en las refinerías de México, el cual inicia en la revisión bibliográfica, continuando con una extensa experimentación realizada a través de pruebas sobre las propiedades físicas, propiedades reológicas, y espectrometría de infrarrojo por Transformada de Fourier, por último se realiza un análisis y procesamiento de los datos para obtener la clasificación por grado de desempeño, las curvas maestras y la interpretación del envejecimiento por medio de los espectros.

Al realizar las pruebas en su totalidad, los resultados obtenidos de las propiedades físicas, determinaron que de los cinco asfaltos en estudio cuatro de ellos son similares (Tula, Salamanca, Cadereyta y Salina Cruz), sin embargo, en la parte del estudio de las propiedades reológicas y de envejecimiento, los asfaltos provenientes de la refinería de Cadereyta y Altamira presentaron un comportamiento distinto a los otros tres.

La investigación llevada a cabo con los asfaltos provenientes de las refinerías en estudio, nos demuestran que en su comportamiento presenta variaciones en los resultados de las diferentes pruebas aplicadas, así como en los modelos y métodos utilizados para el análisis.

Palabras Clave: Asfaltos, Envejecimiento, Propiedades Reológicas, Grado de Desempeño, Propiedades Físicas.

Abstract

The asphalt that is found in México is provided by the refining plants that are dedicated to the processing of petroleum that is produced by refining. The procedure that is carried out in the plants, that are located in different places in México, is theoretically the same when speaking about obtaining asphalts with the same properties.

This document contains a wide experimentation of the different asphalts that are produced in the refineries of México, which begins in the bibliographical revision, continuing with extensive experimentation realized through tests on the physical properties, rheological properties, and infrared spectrometry by the Fourier transform, and finally, a data analysis and processing is performed to obtain the classification by performance grade, master curves, and the interpretation of aging by means of the spectrums.

When performing the tests in their entirety, the results that speak about the physical properties determined that of the five asphalts under study, four of them are similar (Tula, Salamanca, Cadereyta, and Salina Cruz). However, when the rheological and aging properties were studied, asphalts from the Cadereyta and Altamira refineries showed a behavior different from the other three.

The investigation that was carried out on the asphalts from the refineries that were studied showed that in their behavior, they present different variations in the results of each one of the applied tests, as well as in the models and methods used for the analysis.

Keywords: Asphalts, Aging, Rheological Properties, Performance Grade, Physical Properties

Introducción

La construcción de carreteras pavimentadas inició en México en los años 20's con caminos que partían de la ciudad de México hacia Puebla, Pachuca, Cuernavaca y Toluca, posteriormente la construcción se amplió hacia otros centros de población (1). Aproximadamente en la misma época la construcción de carreteras se activó a nivel mundial, debido a esto, la importancia en la calidad de los materiales con las que estas se construían fue un factor muy importante a considerar. Por este motivo se crearon organismos como AASHTO, ASTM y el Instituto de Asfalto, además de las Agencias de Transporte de varios estados norteamericanos (1). A la par, en México se hacían grandes esfuerzos para considerar la calidad dentro de la construcción de las carreteras, lo cual llevo a que en el año de 1927 se editara en México la primera versión de unas "Especificaciones de Caminos" (1). Desde los inicios de la construcción de los caminos pavimentados, la red carretera nacional ha incrementado su longitud a través de los años y actualmente cuenta con más de 333 mil kilómetros de caminos en servicio (1). La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) los clasifica en pavimentados, revestidos, brechas y terracerías, con respecto a la parte pavimentada un 90% son pavimentos flexibles, motivo por el cual es de gran interés el estudio del asfalto en nuestro país (2).

Desde el punto de vista estructural, el propósito principal de un pavimento flexible o asfáltico es soportar las cargas de los vehículos. Se denominan con el nombre de pavimentos flexibles porque tienen propiedades viscoelásticas y pueden soportar hasta cierto grado de deformaciones en su estructura. De los distintos fenómenos que generan el deterioro en los pavimentos flexibles en los últimos años, varios estudios de investigación, se han enfocado en analizar el envejecimiento u oxidación que el asfalto experimenta a través de su vida de servicio, ya que esto genera una fragilización a lo largo del tiempo, la cual reduce su desempeño como pavimento flexible, centrándose en la Reología y el envejecimiento químico que sufre el ligante asfáltico (3). Además, se ha demostrado que el envejecimiento es un proceso continuo en la vida útil del pavimento, también hay evidencia de que el proceso de oxidación varía a través de la profundidad de las capas asfálticas (4).

Una preocupación importante en la ingeniería de carreteras es que mientras que los pavimentos están diseñados inicialmente para un desempeño óptimo, con el tiempo, el envejecimiento del asfalto va cambiando las propiedades del material y esto trae consigo consecuencias.

Por otro lado, para tratar con esta situación, se necesita de un estudio extenso de campo que abarque los distintos parámetros a ser estudiados en los diferentes climas en todo el país, en un periodo significativo de años. Por lo que, existe la necesidad de comprender el envejecimiento del asfalto y la fluencia que éste puede tener en el pavimento, para que los ingenieros puedan tomar decisiones en base a las propiedades que tendrá el asfalto en las diferentes condiciones que puede presentar durante su vida útil (3).

Este documento contiene los resultados de la investigación que se realizó a los asfaltos provenientes de las 5 refinerías de México que producen cemento asfáltico para la construcción de carreteras.

Planteamiento del Problema

En la actualidad en México existe solo una empresa que trabaja en la refinación del petróleo, de la cual se obtiene el asfalto y tiene el nombre de Petróleos Mexicanos (PEMEX), obteniendo en su proceso final un tipo de asfalto denominado EKBÉ PG 64-22, según su clasificación por su Grado de Desempeño. Sin embargo, al contar con varias refinerías en el país, los suministros y procesos que son aplicados tienen variaciones. Debido a que, en la construcción de las carreteras en el país se emplean asfaltos provenientes de PEMEX, se convierte en una necesidad realizar investigaciones a detalle sobre las características reológicas y de envejecimiento de los asfaltos, así como la relación entre ellas.

Objetivos

Objetivo General

Caracterizar las propiedades reológicas y de envejecimiento de los asfaltos provenientes de cinco refinerías mexicanas.

Objetivos particulares

- Determinar las propiedades físicas de los asfaltos en estudio.
- Analizar las características reológicas del asfalto original mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR).
- Someter a envejecimiento a corto plazo empleando el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), y a envejecimiento a largo plazo por medio de la Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV).
- Analizar las características de envejecimiento de los asfaltos en estudio por medio del equipo de Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier (IFTR, por sus siglas en inglés).
- Realizar los barridos de frecuencias y temperaturas para obtener y analizar las curvas maestras de los asfaltos en estudio en sus distintas condiciones de envejecimiento.

1.0. Asfaltos para Pavimentos

El asfalto es un material bituminoso de color oscuro, de consistencia variable y se encuentra dentro del crudo de petróleo o en pocos casos de forma natural aflorando de la superficie, y está constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, que son elementos que proporcionan características aglutinantes, de consistencia y ductilidad. Al calentarse sufre un ablandamiento hasta que alcanza una consistencia líquida (5).

El procedimiento utilizado para su obtención es a través de la refinación, proceso en el cual se busca separar los distintos componentes del petróleo en varias fracciones, dentro de una de ellas se encuentra el asfalto. En la naturaleza se llevan a cabo procesos similares, formando depósitos naturales de asfalto, de los cuales algunos se encuentran libres de materiales extraños, mientras que otros están mezclados en diferentes cantidades de materiales como puede ser agua y otras sustancias (6).

El asfalto es un material de gran interés para la ingeniería de carreteras, ya que es un material con propiedades cementantes y posee propiedades de adhesividad e impermeabilidad (6).

1.1. Proceso de obtención del asfalto

El asfalto se puede obtener mediante el proceso de destilación al vacío del crudo reducido, que es producto de la destilación atmosférica y se puede someter a un proceso de extracción por solvente (6).

El proceso de refinación del petróleo de donde se obtiene el asfalto, se muestra en la Figura 1.

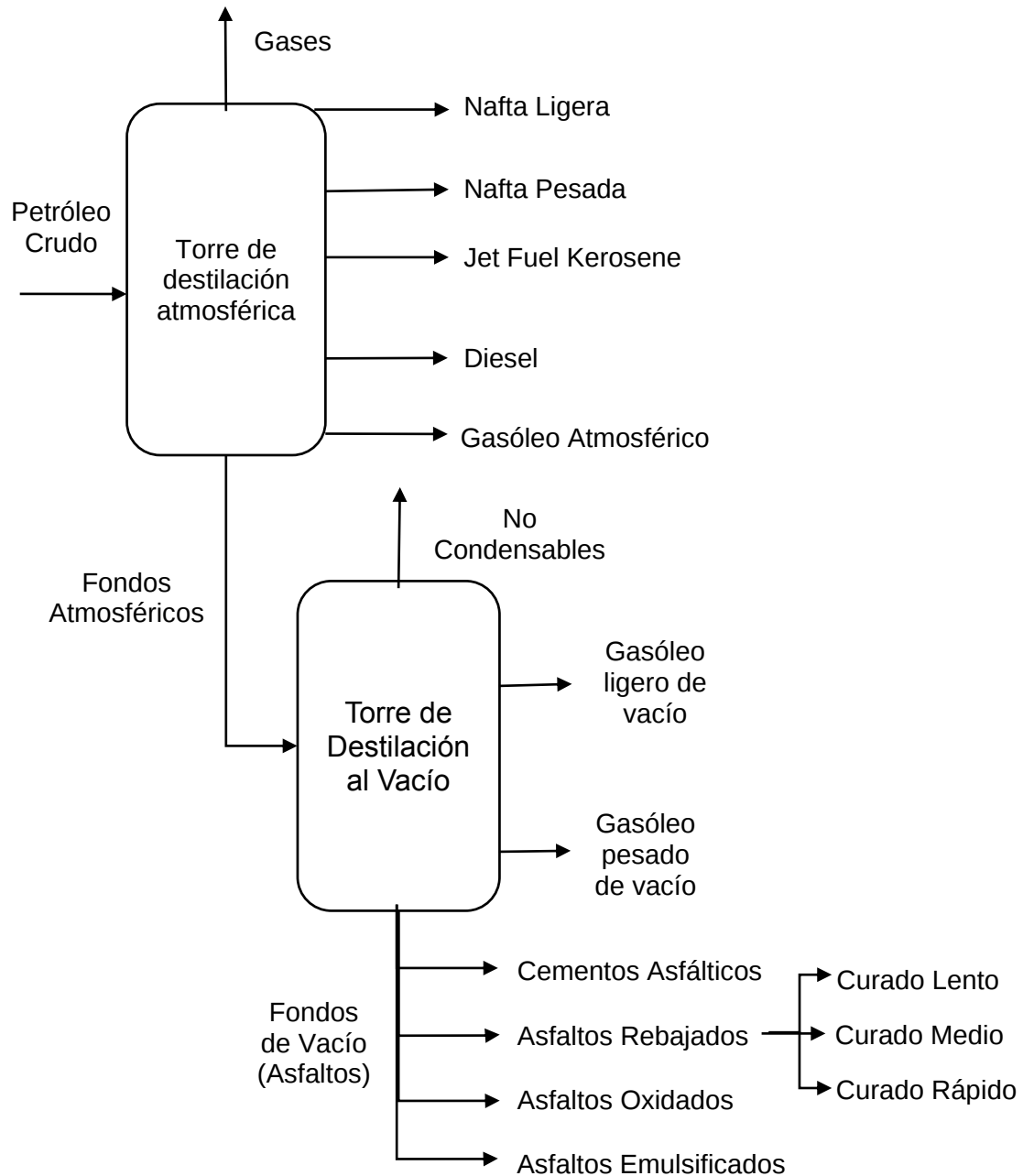


Figura 1. Diagrama de flujo de refinación del petróleo para la producción de asfaltos, elaborado a partir de (7).

1.2. Sistemas de clasificación de Asfaltos

Los asfaltos tienen diferentes formas de ser clasificados conforme a su aplicación final y son definidos por estándares específicos. En este documento se hizo el estudio de 5 asfaltos de diferentes refinerías. La forma en que se pueden clasificar los asfaltos es en base a las penetraciones determinada por la Norma ASTM D946, otra manera es dependiente de la viscosidad que se determina con la Norma ASTM D 3381 y la clasificación en base a su grado de desempeño o PG se determina con la Norma AASHTO MP-1 o ASTM D 6373 (6).

Todas las formas de clasificación mencionadas tienen una serie de procedimientos para poder obtener los parámetros o valores que se requieren, las más comunes son: penetración, punto de ablandamiento, viscosidad, punto de inflamación, como de igual manera se pueden pedir algunos procedimientos con otras especificaciones de acuerdo a la aplicación que se vaya a realizar con el asfalto (6).

A continuación, se describen los métodos de clasificación de los asfaltos más comúnmente usados.

1.2.1. Penetración

La prueba de penetración con base a la Norma ASTM D5-06 se realiza colocando una muestra de asfalto a baño maria durante 1 hora para que se estabilice a una temperatura de 25°C, después se coloca en el penetrómetro y con la aguja indicada para su medición como se muestra en la Figura 2, seguido se coloca en una altura cero con respecto a la superficie de la muestra de asfalto y se aplica una carga de 100g, durante 5 segundos, después de este tiempo se toma la lectura en decimas de milímetro, este procedimiento se repite varias veces para tener un mayor número de datos y que puedan ser confiables.

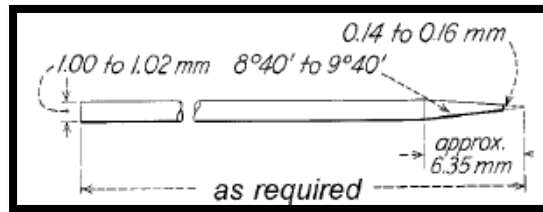


Figura 2. Aguja para prueba de penetración.

Para su clasificación se utiliza la Figura 3, de acuerdo al valor de penetración obtenido, además de que se tienen que cumplir los demás parámetros especificados en la Norma ASTM D946.

D946/D946M – 09a										
TABLE 1 Requirements for Asphalt Cement for Use in Pavement Construction										
	Penetration Grade									
	40–50		60–70		85–100		120–150		200–300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetration at 25°C [77°F], 100 g, 5 s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Flash point, °C [°F] (Cleveland open cup)	230 [450]	...	230 [450]	...	230 [450]	...	220 [425]	...	175 [350]	...
Ductility at 25°C [77°F], 5 cm/min, cm	100	...	100	...	100	...	100	...	100 ^A	...
Solubility in trichloroethylene, %	99.0	...	99.0	...	99.0	...	99.0	...	99.0	...
Retained penetration after thin-film oven test, %	55 +	...	52 +	...	47 +	...	42 +	...	37 +	...
Ductility at 25°C [77°F], 5 cm/min, cm after thin-film oven test test	...	...	50	...	75	...	100	...	100 ^A	...
^A If ductility at 25°C [77°F] is less than 100 cm, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 cm minimum at the pull rate of 5 cm/min.										
TABLE 2 Requirements for Penetration Graded Asphalt Cement										
	Penetration Grade									
	40–50		60–70		85–100		120–150		200–300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetration at 25°C [77°F], 100 g, 5 s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Softening Point, °C [°F]	49 [120]	...	46 [115]	...	42 [108]	...	38 [100]	...	32 [90]	...
Flash point, °C [°F] (Cleveland open cup)	230 [450]	...	230 [450]	...	230 [450]	...	220 [425]	...	175 [350]	...
Ductility at 25°C [77°F], 5 cm/min, cm	100	...	100	...	100	...	100	...	100 ^A	...
Solubility in trichloroethylene, %	99.0	...	99.0	...	99.0	...	99.0	...	99.0	...
Retained penetration after thin-film oven test, %	55 +	...	52 +	...	47 +	...	42 +	...	37 +	...
Ductility at 25°C [77°F], 5 cm/min, cm after thin-film oven test test	...	...	50	...	75	...	100	...	100 ^A	...
^A If ductility at 25°C [77°F] is less than 100 cm, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 cm minimum at the pull rate of 5 cm/min.										

Figura 3. Tabla de Clasificación del asfalto según su penetración según la Norma D946/D946M-09^a.

1.2.2. Viscosidad

La viscosidad es definida como una medida de la resistencia a la deformación de un fluido, que es la relación del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (8).

La clasificación de la viscosidad se basa en la Norma ASTM D3381/D3381M- 13 (ver Figura 4), midiendo la viscosidad dinámica 60°C de acuerdo a la Norma ASTM D2170. Adicionalmente, se requiere medir la viscosidad cinemática 135°C de acuerdo a la Norma ASTM D2171, la cual es otra característica que debe cumplir con los especificados. Con el resultado de la viscosidad dinámica 60°C se clasifica el cemento asfáltico dependiendo del rango de viscosidades obtenido AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 o AC-40 según sean sus propiedades físicas (5).

D3381/D3381M - 13						
TABLE 1 Requirements for Asphalt Cement, Viscosity Graded at 60°C [140°F] Based on Original Asphalt						
Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa-s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	80	110	150	210	250	300
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	200	120	70	40	30	20
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, ^a min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa-s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100	50	20	15	10
^a Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to Solubility in TCE.						
^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.						
TABLE 2 Requirements for Asphalt Cement Viscosity Graded at 60°C [140°F] Based on Original Asphalt						
NOTE: 1—Table 2 specifies asphalts that are less temperature susceptible than those specified by Table 1. Asphalts that meet Table 2 requirements will also meet Table 1 requirements of the same grade.						
Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa-s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	220	140	80	60	50	40
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, ^a min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa-s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility ^b , 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100	75	50	40	25
^a Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to Solubility in TCE.						
^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.						
TABLE 3 Requirements for Asphalt Cement Viscosity Graded at 60°C [140°F] Based on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test						
Tests on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test: ^a	Viscosity Grade					
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000	
Viscosity, 60°C [140°F], Pa-s	100 ± 25	200 ± 50	400 ± 100	800 ± 200	1600 ± 400	
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	140	200	275	400	550	
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	65	40	25	20	20	
% of original penetration, 25°C [77°F], min	—	40	45	50	52	
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100 ^b	75	75	75	
Tests on original asphalt:						
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	205 [400]	220 [425]	225 [440]	230 [450]	240 [460]	
Solubility in trichloroethylene, ^c min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	
^a Thin-film oven test may be used but the rolling thin film oven test shall be the reference method.						
^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.						
^c Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to Solubility in TCE.						

Figura 4. Tabla de clasificación por viscosidad Norma ASTM D 3381/D3381M-13.

Viscosidad dinámica a 60°C. Esta es una propiedad fundamental que cuantifica la consistencia en una temperatura de 60°C. Es aplicable en materiales con viscosidades de 0.0036 a 20 000 Pa*s, y valora el comportamiento del material afectado por la temperatura (9).

Viscosidad Cinemática a 135°C. Este ensayo es también de gran interés en el asfalto, ya que determina el efecto de la temperatura en el comportamiento del material, garantizando así, las condiciones óptimas para el almacenamiento, transporte y bombeo. Además, este parámetro también es utilizado para calcular la temperatura de mezclado y compactación (9).

1.2.3. Grado PG

La clasificación por grado de desempeño “PG” acompañado de dos números que indican las temperaturas máximas y mínimas de diseño, tiene como base la Norma AASHTO M320 o ASTM D6373. Se lleva a cabo mediante ensayos específicos que tienen como fin la caracterización del asfalto en un rango o intervalo de temperaturas que buscan identificar el comportamiento que tendrá el asfalto en las diferentes etapas del pavimento.

En la actualidad esta clasificación es la más común en México, ya que generalmente los asfaltos son vendidos conforme al grado de desempeño, por la razón de que al hacer pavimentaciones se realizan estudios climáticos que dictaminan las temperaturas que se presentaran durante la vida útil de éste, y con ellas se define el tipo de asfalto necesario para las condiciones climáticas del proyecto.

Para realizar la caracterización, se somete la muestra del asfalto a esfuerzo de corte mediante el equipo de Reómetro de Corte Dinámico o Dynamic Shear Rheometer (DSR, por sus siglas en inglés), y obtener el Grado de Desempeño de la temperatura máxima correspondiente al ligante en estudio. Similarmente, se somete con carga axial a una viga elaborada con asfalto procesado del PAV mediante el equipo de

Reómetro de Viga a Flexión o Bending Beam Rheometer (BBR, por sus siglas en inglés), y determinar su Grado de Desempeño en la temperatura mínima a la que pertenezca.

La Figura 5 se utiliza para la clasificación por su Grado de Desempeño, de acuerdo al parámetro $G^*/\sin \delta$ obtenido del asfalto original, además debe cumplir con todos los otros parámetros en sus distintas etapas.

Max. Design Temp.	PG 46			PG 52			PG 58			PG 64			PG 70			PG 76			PG 82							
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34		
Original																										
≥ 230°C	Flash Point																									
≤ 3 Pa·s @ 135°C	Rotational Viscosity																									
≥ 1.00 kPa	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																									
	46			52			58			64			70			76			82							
(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change ≤ 1.00%																										
≥ 2.20 kPa	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																									
	46			52			58			64			70			76			82							
(Pressure Aging Vessel) PAV																										
20 hours, 2.10 MPa	90			90			100			100			100 (110)			100 (110)			100 (110)							
≤ 5000 kPa	DSR $G^* \sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																									
	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28		
	Intermediate Temp. = [(Max. + Min.)/2] + 4																									
S ≤ 300 MPa	BBR S (creep stiffness) & m-value (Bending Beam Rheometer)																									
m ≥ 0.300	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24
If BBR m-value ≥ 0.300 and creep stiffness is between 300 and 600, the Direct Tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement.																										
Determine the critical cracking temperature as described in PP 42.	DTT (Direct Tension Tester)																									
	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24
Table 2 AASHTO Performance Grades																										

Figura 5. Tabla de clasificación por grado de desempeño en base a la Norma AASHTO M320.

1.3 Reología de los Asfaltos

La Reología estudia la respuesta mecánica de un material, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de una carga (8).

El envejecimiento que sufre el asfalto es una propiedad mecánica, por lo que no se puede medir numéricamente. Entonces, para poder tener una referencia sobre cómo actúa el envejecimiento en el ligante, se necesita tener un conjunto de propiedades que lo representen, y medir el cambio que presenta. Para ello, se desarrollaron parámetros reológicos que representan cada una de las etapas de envejecimiento en las que se somete el cemento asfáltico.

Para la caracterización y modelación del comportamiento reológico del asfalto, se consideró en este trabajo como un material visco elástico lineal, como en muchos otros trabajos referentes al mismo tema (6).

1.3.1. Parámetros Reológicos

Los parámetros reológicos son útiles para determinar las propiedades físicas de algún material, para el caso de éste estudio se aplicara en asfalto. Para determinar los parámetros del cemento asfáltico se somete esfuerzos de corte con el DSR principalmente. Estos son medidos en su estado original, envejecido a corto plazo y envejecido a largo plazo. A continuación se describen los parámetros de cada uno.

1.3.1.1. Asfalto Original

En primer lugar se realiza el ensayo en el asfalto original con base en la Norma ASTM D7175, que consiste en tomar una muestra de material y ensayarlo en el DSR a una frecuencia de 1.6 Hz a diferentes temperaturas. El parámetro " $G^* / \sin \delta$ " debe de cumplir con un valor de > 1.00 kPa, ya que los valores obtenidos de la prueba deben ser mayores de 1.00 kPa, y si es menor de éste, se termina de evaluar el ensayo, y nos quedamos con el último resultado que esté más cercano al parámetro especificado, como se muestra en la Figura 6.

Tabla 1. Ejemplo de los datos obtenidos de la Refinería de Tula para el asfalto original.
Parámetro Reológico

Time s	Temp (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Complejo (Pa)	$G^* / \sin \delta$ (Pa)
26.8	58	1.596	4221	4286
26.84	64	1.596	2025	2043
26.86	70	1.596	969.8	974.7

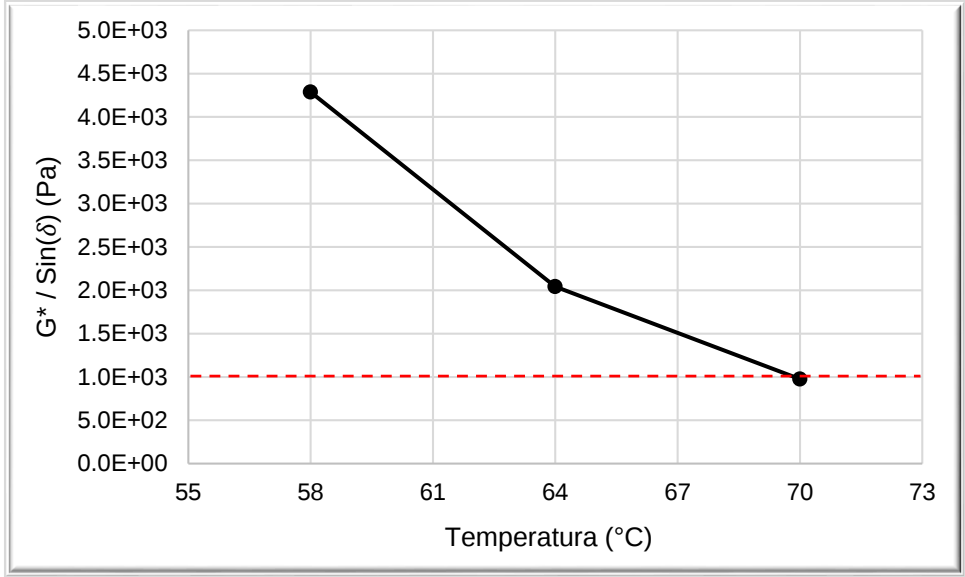


Figura 6. Ejemplo de la caracterización del asfalto realizado para la Refinería de Tula para el asfalto original.

En los ensayos del DSR, éste parámetro es fundamental, porque con él se determina el temperatura máxima del grado de desempeño para el asfalto en estudio. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del asfalto proveniente de Tula, se observa que el parámetro $G^* / \sin \delta$ es menor a 1kPa para la temperatura de 70 °C, por lo que, el grado de desempeño de este asfalto es PG 64.

Max. Design Temp.	PG 46	PG 52				PG 58				PG 64				PG 70				PG 76				PG 82									
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Original																															
≥ 230 °C	Flash Point																														
≤ 3 Pa-s @ 135 °C	Rotational Viscosity																														
≥ 1.00 kPa	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																														
	46	52				58				64				70				76				82									

Figura 7. Parámetro que determina el grado de desempeño en la temperatura alta, Norma AASHTO M320.

1.3.1.2. Asfalto Envejecido por el Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

El asfalto que fue envejecido mediante RTFOT se ensayar también en el equipo de DSR, con base en la Norma ASTM D 7175. La prueba se realiza con una muestra de material ensayándola en el equipo a una Frecuencia de 1.6 Hz a diferentes

temperaturas, generalmente la prueba se realiza a una temperatura más baja a la indicada en su clasificación por grado de desempeño, y termina hasta que el resultado cumple el parámetro " $G^*/\sin \delta$ " y este es > 2.20 kPa.

A diferencia del caso anterior, este parámetro es únicamente una verificación que debe de cumplir con lo que marca la especificación, y siendo mayor de este el material es adecuado. En la Figura 8 se muestra el parámetro de la caracterización que debe de cumplir.

Max. Design Temp.	PG 46			PG 52			PG 58			PG 64			PG 70			PG 76			PG 82						
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34
Original																									
≥ 230°C	Flash Point																								
≤ 3 Pa·s @ 135°C	Rotational Viscosity																								
≥ 1.00 kPa	DSR G*/sin δ (Dynamic Shear Rheometer)																								
	46			52			58			64			70			76			82						
(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change ≤ 1.00%																									
≥ 2.20 kPa	DSR G*/sin δ (Dynamic Shear Rheometer)																								
	46			52			58			64			70			76			82						

Figura 8. Parámetro del RTFO determinado por su grado de desempeño, Norma AASHTO M320.

1.3.1.3. Asfalto Envejecido por Pressurized Aging Vessel (PAV)

El asfalto envejecido mediante PAV debe de ser sometido a la prueba de corte dinámico en el equipo DSR, con base en la Norma ASTM D 7175. La prueba consiste en el ensayo de una muestra envejecida del material en el DSR con una Frecuencia de 1.6 Hz en un rango de temperaturas intermedias (en función del grado PG a altas y bajas temperaturas), de mayor a menor en decrementos de 3°C hasta que cumplan con el parámetro " $G^*\cdot\sin \delta$ " y que sean menor de 5000 kPa, es decir, que los resultados que arroje cada temperatura del parámetro mencionado debe de ser menor de 5000 kPa, y cuando rebasa el límite del valor se termina de medir, y tomamos el valor de interés.

La manera en que se toma el valor de la tabla de grados de desempeño (ver Figura 9), es con el grado mínimo del asfalto con el que fue caracterizado en su ficha de compra, de ahí se toman un valor por debajo para comenzar con sus mediciones.

El equivalente que resulte en la tabla va disminuyendo para el ensayo, y únicamente lo que se debe de comprobar es que cumpla para la temperatura que se indica inicialmente mediante el parámetro mencionado.

Este parámetro es de cierta manera diferente a los demás, porque los datos que se necesitan es su temperatura mínima y va disminuyendo sus mediciones, siendo en los anteriores de forma contraria. Se muestra en la Figura 9 parte de la tabla de caracterización de los asfaltos por grados de desempeño.

Max. Design Temp.	PG 46			PG 52			PG 58			PG 64			PG 70			PG 76			PG 82																		
Min. Design Temp.	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34													
Original																																					
≥ 230°C	Flash Point																																				
≤ 3 Pa·s @ 135°C	Rotational Viscosity																																				
≥ 1.00 kPa	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																																				
	46			52			58			64			70			76			82																		
(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change ≤ 1.00%																																					
≥ 2.20 kPa	DSR $G^*/\sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																																				
	46			52			58			64			70			76			82																		
(Pressure Aging Vessel) PAV																																					
20 hours, 2.10 MPa	90			90			100			100			100 (110)			100 (110)			100 (110)																		
≤ 5000 kPa	DSR $G^* \sin \delta$ (Dynamic Shear Rheometer)																																				
	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28

Las curvas maestras pueden ser calculadas con los resultados que se obtienen del ensayo mencionado anteriormente, en donde el módulo de corte complejo G^* o el ángulo de fase son funciones visco-elásticas y se pueden representar en función de la frecuencia en escala logarítmica o semilogarítmica (10). Estas formas de representación han sido ampliamente generadas e interpretadas a través de los años para caracterizar las propiedades reológicas de los asfaltos convencionales y modificados, además de que la caracterización de tres dimensiones: módulo complejo, tiempo y temperatura puede ser reducida en un formato de dos dimensiones: módulo, frecuencia reducida, esto es, usando el principio de superposición tiempo-temperatura (ver Figura 10) (11).

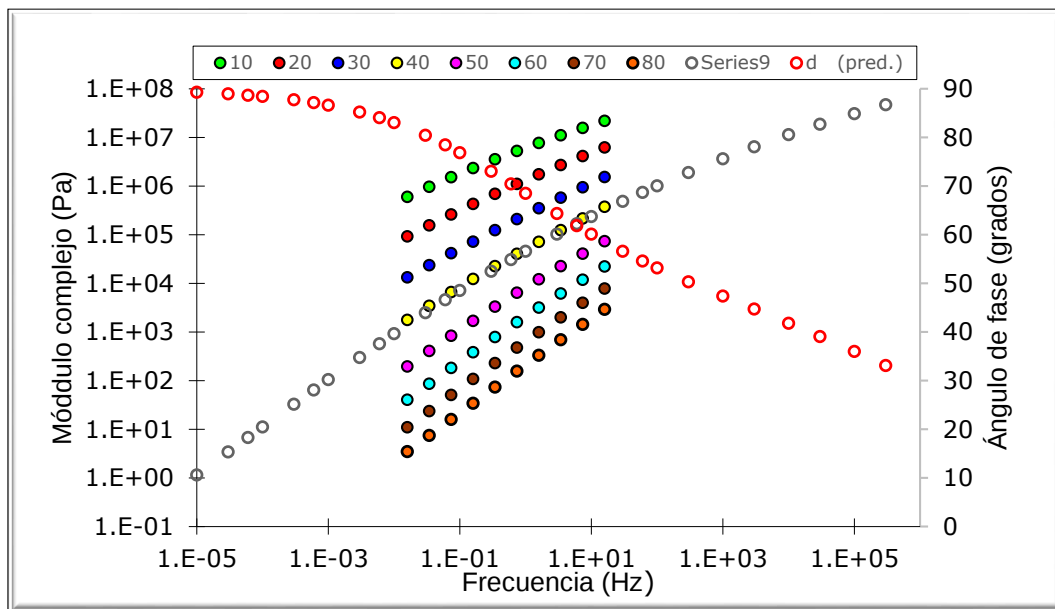


Figura 10. Curva maestra de módulo complejo y ángulo de fase.

La modelación de curvas maestras es de gran utilidad, ya que necesitan pocos parámetros definidos dependiente de cada modelo que simula el comportamiento del asfalto. Por otro lado, las pruebas que se realizan para poder determinar las curvas maestras de manera experimental, como pueden ser los barridos de frecuencia y diferentes temperaturas, son muy laboriosos, además consumen mucho tiempo, son costosos y requieren de operadores expertos (12). Sin embargo, esto nos proporciona un entendimiento menos complejo del material en estudio, ya

que realiza una estimación de las propiedades mecánicas–dinámicas en un rango amplio de temperaturas y tiempos de cargas o frecuencias que se pueden experimentar en campo y que no es práctico simularlas directamente en laboratorio (13).

1.3.2.1. Propiedades Evaluadas

Varias formas de análisis mecánico-dinámico son usadas para medir las propiedades reológicas de los asfaltos, usualmente por medio de pruebas oscilatorias a través del DSR. El principio usado con el DSR es el aplicar un esfuerzo o deformación sinusoidal a un disco delgado de asfalto, el cual es colocado entre dos platos paralelos del DSR. El ensayo puede ser en modo de control de esfuerzo o deformación, dependiendo de cuál de las variables son controladas por el equipo. Las pruebas en el DSR, son realizadas sobre un amplio rango de frecuencias y temperaturas, en caso de que se desee obtener una completa caracterización de las propiedades viscoelásticas de los asfaltos. Estas pruebas, son llevadas a cabo por medio de la inducción de una pequeña deformación (dentro del rango LVE) para posteriormente, con los datos reológicos, se efectuó un desplazamiento entre las frecuencias y temperaturas de ensayo a través del Principio de Superposición Tiempo-Temperatura (TTSP, por sus siglas en inglés) (14).

Las propiedades que evalúa el modelo de curvas maestras comienza con la magnitud del módulo de corte complejo o módulo dinámico, $|G^*|$, y puede ser calculada como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las dos componentes.

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad \text{Ec. 1}$$

La componente en fase o la parte real de $|G^*|$ es llamada módulo (corte) de almacenamiento. Para el cálculo del módulo de almacenamiento desde el módulo complejo y el ángulo de fase se utiliza la ecuación 2.

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad \text{Ec. 2}$$

El módulo de almacenamiento describe la cantidad de energía que es almacenada y liberada elásticamente en cada sollicitación y es por lo tanto, también conocida como módulo elástico o la componente elástica del módulo complejo (15).

El módulo (corte) de pérdida es la componente fuera de fase de la parte imaginaria de $|G^*|$. Para el cálculo del módulo de pérdida desde el módulo complejo y al ángulo de fase se utiliza la siguiente ecuación:

$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad \text{Ec. 3}$$

El módulo de pérdida describe la tasa de disipación de energía promedio en el estado continuo de oscilación obtenido en una prueba dinámica. El módulo de pérdida es también descrito como módulo viscoso o la componente viscosa del módulo complejo. La tangente de pérdida es definida como la relación de las componentes viscosas y elásticas del módulo complejo o simplemente la tangente del ángulo de fase:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{G''}{G'} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Las diferentes relaciones entre los distintos módulos: complejo, almacenamiento, pérdida y ángulo de fase, son efectivamente visualizadas a través de una representación vectorial, como se muestra esquemáticamente en la Figura 11.

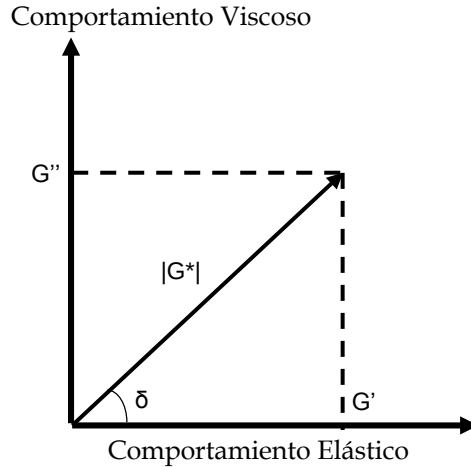


Figura 11. Relación entre $|G^*|$, G' , G'' y δ

Los módulos de almacenamiento y pérdida son comúnmente malinterpretados como módulos elástico y viscoso, respectivamente. En realidad, la componente elástica de la respuesta solo representa parte del módulo de almacenamiento y la respuesta viscosa solo una parte del módulo de pérdida. En adición, los materiales viscoelásticos exhiben una significativa cantidad de respuesta elástica retrasada que es dependiente del tiempo pero completamente recuperable. El módulo de almacenamiento y pérdida reflejan una proporción de la respuesta elástica retrasada (10).

1.3.2.2. Modelo Modificado de Havriliak-Negami

Zhao *et al.* (16) (17), han demostrado que el modelo modificado de Havriliak-Negami (MHN), mostrado en la Ecuación 5, puede caracterizar el comportamiento LVE de forma precisa.

$$G^*_{MHN}(i\omega) = G_e + \frac{G_g - G_e}{\left[1 + \left(\frac{\omega a}{i\omega}\right)^\alpha\right]^\beta} \quad Ec. 5$$

En donde: ω_0 = parámetro de ubicación que controla la posición horizontal de la curva maestra; α y β son asociados con los mecanismos de relajación, controlando el ancho y la asimetría del pico del módulo de pérdida, G_g = Módulo Vítreo. El modelo MHN es esencialmente un modelo de la curva maestra del módulo complejo, cuando el TTSP es involucrado y ω se vuelve la frecuencia angular reducida. Las fórmulas analíticas de las curvas maestras de los módulos de almacenamiento y pérdida del modelo MHN pueden ser derivadas a través del álgebra compleja, resultando las siguientes ecuaciones (16) :

$$G'(\omega) = G_e + (G_g - G_e) \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{\alpha\beta/2} \cos\beta\theta(\omega)}{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^\alpha + 2 \cos(\alpha\pi/2) + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^\alpha\right]^{\beta/2}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$G''(\omega) = (G_g - G_e) \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{\alpha\beta/2} \sin\beta\theta(\omega)}{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^\alpha + 2 \cos(\alpha\pi/2) + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^\alpha\right]^{\beta/2}} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\tan \theta(\omega) = \frac{\sin(\alpha\pi/2)}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^\alpha + \cos(\alpha\pi/2)} \quad \text{Ec. 8}$$

En la Ecuación 8, $\theta(\omega)$ no es el ángulo de fase. El ángulo de fase es obtenido con la ecuación 4.

Se puede deducir que para el modelo MHN $G^* \rightarrow G_e$ y $\delta \rightarrow 0^\circ$ cuando $\omega \rightarrow 0$, y $G^* \rightarrow G_g$ y $\delta \rightarrow 0^\circ$ cuando $\omega \rightarrow \infty$. Por lo tanto, el modelo representa un sólido viscoelástico. Cuando el modelo MNH es $\alpha = 1$ es reducido al modelo Cole-Davison cuando $\beta = 1$ se reduce al modelo Cole-Cole.

Este modelo es apto para poder modelar el comportamiento Viscoelástico Lineal en varios parámetros como pueden ser: módulo de corte dinámico, el ángulo de fase, módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida. Todos con los mismos coeficientes y utilizando el mismo factor de desplazamiento tiempo-temperatura, lo

cual hace una simplificación considerable en el análisis de las distintas características en LVE de los asfaltos.

El modelo MNH se deduce para el módulo complejo y está desarrollado en base al dominio complejo. El módulo dinámico es obtenido con la ecuación 1,6 y 7.

Cuando se involucra el principio de TTSP, la frecuencia reducida ω en la ecuación 5, se relaciona con la frecuencia cíclica f por $\omega = 2\pi f \alpha_T$.

α_T es el factor de desplazamiento tiempo-temperatura

Por esto, como todas las funciones del dominio de la frecuencia están derivadas teóricamente del modelo MNH, el α_T puede ser igual para todas esas funciones, así como también todas las funciones del dominio del tiempo obtenidas a través de interconversión (17).

Cuando se utilice un modelo de un sólido viscoelástico y se requiera que éste se comporte como un líquido viscoelástico, se tiene que hacer una modificación, adicionando un amortiguador aislado en serie (18). Por lo que, Zhao *et al.* (19) proponen un modelo, en donde, definen los parámetros para caracterizar el comportamiento de un líquido viscoelástico empleando el modelo MNH, adicionando un amortiguador conectado en serie. La fluencia compleja (compliance) del modelo propuesto puede ser obtenida usando la regla de combinación, la cual establece que si un sistema consiste de distintos componentes conectados en serie, la fluencia compleja del sistema es la sumatoria de las fluencias complejas de todos los componentes (18). La fluencia compleja de un amortiguador es $\psi_f/j\omega$. Por lo que la fluencia del modelo propuesto es:

$$J^*(i\omega) = \frac{1}{G_{MNH}^*(i\omega)} + \frac{\psi_f}{j\omega} \quad Ec. 9$$

donde ψ_f es la fluidez o el recíproco de la viscosidad del amortiguador.

Entonces se tiene que para un líquido viscoelástico, $G_e = 0$ y el módulo complejo del modelo propuesto es obtenido como el recíproco de la fluencia compleja:

$$G^*(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{G_g} \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{i\omega} \right)^\alpha \right]^\beta + \frac{\psi_f}{j\omega}} \quad \text{Ec. 10}$$

Mediante algebra compleja se realiza la derivación del módulo de almacenamiento y pérdida del módulo complejo de la Ecuación 10, dando como resultado las ecuaciones del modelo propuesto:

$$G'(\omega) = \frac{\omega^2 A \cos \beta \theta(\omega)}{\omega^2 + \psi_f A [\psi_f A + 2\omega \sin \beta \theta(\omega)]} \quad \text{Ec. 11}$$

$$G''(\omega) = \frac{\omega A [\omega \sin \beta \theta(\omega) + \psi_f A]}{\omega^2 + \psi_f A [\psi_f A + 2\omega \sin \beta \theta(\omega)]} \quad \text{Ec. 12}$$

$$A = \frac{G_g \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{\alpha \beta / 2}}{\left[\left(\frac{\omega_0}{i\omega} \right)^\alpha + 2 \cos(\alpha \pi / 2) + \left(\frac{\omega_0}{i\omega} \right)^\alpha \right]^{\beta / 2}} \quad \text{Ec. 13}$$

En donde: $\theta(\omega)$ es definido en la Ecuación 8. Derivado de las Ecuaciones 1, 2, 3, 4, 11 y 12; se observa que $G^* \rightarrow 0$ y $\delta \rightarrow 90^\circ$ cuando $\omega \rightarrow 0$, y $G^* \rightarrow G_g$ y $\delta \rightarrow 0^\circ$ cuando $\omega \rightarrow \infty$. Por lo que, el modelo en la Ecuación 10, representa un líquido viscoelástico.

En la Ecuación 9, se muestra el modelo general propuesto por Zhao *et al.* (19). Cuando el modelo se utiliza para un sólido viscoelástico, $\psi_f = 0$, entonces se reduce a la Ecuación 5. De otra manera, cuando se requiere utilizar el modelo para un líquido viscoelástico, $G_e = 0$, el modelo se reduce a la Ecuación 10. Además, el mismo factor de desplazamiento tiempo-temperatura aplica para varias funciones LVE. Por lo que, el modelo seleccionado es consistente con las teorías LVE.

Los parámetros α y β en el modelo seleccionado son valores positivos. Se puede deducir de las Ecuaciones 12 y 13, que si $\alpha > 1$ el valor de $\tan \theta(\omega)$ puede ser negativo a bajas frecuencias, lo cual consecuentemente puede generar valores negativos de módulo de pérdida. Por lo tanto, α necesita ser menor que o igual a 1. De las Ecuaciones 11 a 13, se puede deducir que la restricción $\alpha\beta \leq 1$ tiene que ser satisfecha para permitir que el módulo de almacenamiento sea positivo cuando la frecuencia se acerque a 0. Las mismas restricciones pueden ser derivadas de las Ecuaciones 11 y 12. Por lo tanto, los coeficientes del modelo α y β necesitan cumplir dos restricciones, definidas como $\alpha \leq 1$ y $\alpha\beta \leq 1$.

1.4 Envejecimiento en Asfaltos

El envejecimiento en el asfalto tiene una gran importancia en su comportamiento durante su vida de servicio, por lo cual, se han hecho grandes esfuerzos en investigaciones para llevar a cabo una caracterización completa y poder cuantificar así el envejecimiento, todo esto con el objetivo de desarrollar un modelado del material que se pueda aplicar en la práctica. En la actualidad la modelación del material es un proceso necesario para comprender los resultados de la caracterización del envejecimiento del asfalto en laboratorio. Entonces si se pudiera realizar una caracterización completa, aplicable al asfalto hasta el final de su vida útil y además el modelo represente de manera adecuada el cambio de sus propiedades a lo largo del tiempo, se tendrían avances significativos en el diseño de pavimentos (4).

La causa de que el asfalto sufra un envejecimiento en su estructura compleja de hidrocarburos es la temperatura, ya que tiene una gran influencia en su fragilidad y consistencia. Esto hace que la composición química cambie gradualmente y así mismo se modifiquen sus propiedades físicas, haciendo que el asfalto tome una consistencia líquida. Por esta razón es que existen parámetros que comprenden la

oxidación del material y son usados para la caracterización de sus propiedades mecánicas (6)

A través de los años se han realizado distintas investigaciones en el asfalto con el objetivo de modelar el material por medio de diferentes modelos de envejecimiento, algunos son más completos y complicados, pero esto aumenta su precisión. Varios de ellos han sido creados y desarrollados en grandes proyectos de investigación que abarcaron el desarrollo que tiene el material en sus estados de envejecimiento, y que son adaptados cada uno de ellos a la experimentación que se utilizó en su momento. Por esta razón es que se vuelve complicado poder comparar los resultados de los diferentes asfaltos, y también crea un conflicto con respecto al modelo a seguir para un proyecto nuevo (4).

En el siguiente bloque se describen algunos de los modelos más relevantes para evaluar el envejecimiento del asfalto.

1.4.1. Parámetros Empíricos (penetración, punto de reblandecimiento, etc.)

Los parámetros empíricos pueden ser obtenidos de pruebas sencillas aplicables en los asfaltos, y que nos representan de forma simple cuanto puede llegar a envejecerse el asfalto, ya sea a corto o largo plazo según sea el estudio. Esta forma de representación del material es de una manera muy general. El grado de oxidación que tiene en cada estado es aproximado y de forma cualitativa, como lo dice su nombre es un parámetro de forma empírica que simplemente estima un porcentaje de lo que puede suceder en sus propiedades físicas.

Principalmente es aplicable en las pruebas de penetración, punto de reblandecimiento y viscosidad. Estas son pruebas que se emplean en la caracterización de las propiedades físicas de los asfaltos, así que no requiere de ensayos diferentes a los incluidos en las especificaciones para poder realizar el

cálculo de la tasa de envejecimiento. Puede realizarse en los tres procesos diferentes que recibe el asfalto para su caracterización, que corresponde al material original, después del envejecimiento por el RTFOT y después del envejecimiento en PAV, de ellos se pueden obtener dos porcentajes con los resultados entre cada etapa, que son:

Parámetro 1. La forma en que se utilizan estos parámetros es determinando una relación de los resultados obtenidos, primeramente del asfalto original según sea la prueba a la que se le quiere aplicar, entre el resultado generado del asfalto envejecido a corto plazo proveniente del RTFOT, y así calcular el porcentaje que se obtiene de envejecimiento entre estos dos estados que presenta el material.

Parámetro 2. En otro caso, este mismo procedimiento puede ser aplicado en la etapa que corresponde al asfalto envejecido a corto plazo por el RTFOT y relacionarlo entre el asfalto envejecido a largo plazo proveniente del PAV, y calcular el porcentaje que presenta el material en estas etapas.

1.4.2. Modelos de Envejecimiento

1.4.2.1. Sistema de Envejecimiento Global

El Sistema de Envejecimiento Global (GAS, por sus siglas en inglés), es utilizado con el software Pavemente ME Design (20). El modelo está desarrollado para funcionar de forma continua, con el objetivo de analizar el comportamiento de envejecimiento y el cambio de rigidez del asfalto, utilizando para ello la sección estructural del pavimento a diseñarse. Este modelo fue desarrollado en función de la viscosidad que presenta el asfalto basándose en el método de susceptibilidad viscosidad-temperatura (A-VTS, por sus siglas en inglés), el cual se representa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\log \eta = 10^{[A+VTS \log T]} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

η - Viscosidad del asfalto a la temperatura deseada, Centi-Poise (Cp);

A- Intercepto de la relación viscosidad-temperatura, Cp;

VTS- Susceptibilidad a la viscosidad-temperatura o pendiente de A-VTS;

T- Temperatura de interés del ensayo en Grados Rankin ($^{\circ}R = (^{\circ}F + 459.67)$).

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad Ec. 15$$

Donde:

η - Viscosidad del asfalto, cP;

G^* -Módulo de corte complejo del asfalto, Pa;

δ - Ángulo de fase del módulo de corte complejo del asfalto, grados;

10- Representa la frecuencia de ensayo de 10 rad/s.

$$\log \alpha_T = c(10^{[A+VTS \log T]} - 10^{[A+VTS \log T_R]}) \quad Ec. 16$$

Donde:

α_T - Factor de cambio en función de la temperatura, T;

c- Coeficiente de ajuste.

Este modelo hace una estimación de la viscosidad del asfalto después de que es mezclado y tendido, representado a la rigidez que tiene inicialmente el asfalto después de que es elaborado para una carpeta asfáltica (ver Ecuación 17) (21). Esta ecuación fue desarrollada para realizar la estimación de la viscosidad después de su construcción o puede ser utilizada para fines de laboratorio en donde se someta el asfalto al ensayo en el RTFO o materiales extraídos después de mezclar y pavimentar.

$$\log(\log(\eta_{t=0})) = a_0 + a_1 \log(\log(\eta_{orig})) \quad Ec. 17$$

Donde:

$$a_0 = 0.054405 + 0.004082 * code;$$

$$a_1 = 0.972035 + 0.010886 * code;$$

$n_{t=0}$ - Viscosidad del asfalto después de mezclar y colocar, cP, a la temperatura de referencia, T_r °R;

n_{orig} - Viscosidad del asfalto original, cP, a la temperatura de referencia, T_r °R;

$code$ - Resistencia al endurecimiento, tomando un valor de -1, 0, 1 o 2 dependiendo de la relación $\log \log \eta_{RTFO}$ y $\log \log \eta_{orig}$;

n_{rtfo} - Viscosidad del asfalto envejecido por el RTFOT, cP, a la temperatura de referencia, T_r °R.

En este sistema se estima la viscosidad del cemento asfáltico en la superficie del pavimento en cualquier tiempo de la vida de servicio. La superficie es definida a 6 mm (0.25 pulgadas) bajo la superficie real del pavimento, esto es, debido a que el modelo fue desarrollado mediante extracciones de pavimento en servicio. (21).

$$\log \log \eta_{t>0} = \frac{\log(\log(\eta_{t=0})) + A * t}{1 + B * t} \quad Ec. 18$$

Donde:

$$A = -0.004166 + 1.41213 * C + C * \log(Maat) + D * \log(\log(\eta_{t=0}));$$

$$B = 0.197725 + 0.068384 * \log(C);$$

$$C = 10^{274.4946 - 193.831 * \log(T) + 33.9366 * \log(T)^2};$$

$$D = -14.5521 + 10.47662 * \log(T) - 1.88161 * \log(T)^2;$$

$\eta_{t=0}$ - Viscosidad del ligante después de mezclar y compactar, cP, a la temperatura, T °R;

$\eta_{t>0}$ - Viscosidad del asfalto al tiempo t , cP, a la temperatura, T , °R;

$Maat$ - Temperatura media anual del aire, °F;

T - Temperatura, °R;

t - Tiempo, meses.

Existen ecuaciones adicionales del mismo tipo en el modelo GAS, las cuales representan los cambios en los vacíos de aire y la viscosidad dependiendo de la profundidad a la que se estime de la carpeta asfáltica.

Las ecuaciones anteriores tienen como base de desarrollo la medición de asfaltos no modificados, que fueron probados cuando se desarrolló el modelo GAS. Al modelar un asfalto en donde puedan variar sus características (por ejemplo, asfaltos modificados), las viscosidades que se predicen en este modelo pueden ser poco precisas.

1.4.2.2. Procedimiento del Instituto de Investigaciones del Oeste

Este modelo tiene una base más fundamentada que el descrito anteriormente, ya que el Sr. Ron Glaser del Western Research Institute (WRI, por sus siglas en inglés), desarrolló un modelo que comprende un mecanismo de envejecimiento dual en el asfalto, el cual consiste en estudiar el material en dos partes de sus grupos funcionales, en donde sufre los principales cambios, como son los sulfóxidos y en una segunda instancia en el proceso las cetonas. Usando como base en el desarrollo los asfaltos que se estudiaron en la WRI por el Dr. Claine Petersen y colegas (22).

Los grupos de sulfóxidos y cetonas son creados tras el envejecimiento en el asfalto, mediante el método de Espectroscopia de Infrarrojo de la Transformada-Fourier (FTIR), se identifica el pico de cada grupo funcional a 1.034 cm^{-1} y 1.693 cm^{-1} respectivamente. La cetona es considerada el grupo molecular más grande dentro del grupo funcional de los carbonilos, y estos se encuentran en la banda de 1.820 y 1.650 cm^{-1} (4).

En base a estos grupos funcionales que actúan en el proceso de envejecimiento en el asfalto, se desarrolló un modelo de oxidación fundamentado en extensos estudios

realizados en laboratorio (23). De donde, se obtuvo un modelo que determina la velocidad de envejecimiento del asfalto, Ecuación 19.

$$[P(t)] = M \left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) (1 - e^{-k_1 P o_2^n t}) + k_2 P o_2^m M t + [S = O + C = O]_{rtfo} \quad Ec. 19$$

Donde:

$[P(t)] = [S = O + C = O]_t$, Presión de oxidación o contenido de sulfoxido y carbonilo en el tiempo, t;

$k_1 = e^{18.78} e^{\frac{-7164}{T}}$, Coeficiente de velocidad de reacción rápida;

$k_2 = e^{10.95} e^{\frac{-5207}{T}}$, Coeficiente de velocidad de reacción lenta o constante;

$P o_2^m = \left(\frac{P_{tot}}{0.74}\right)^m$,

$P o_2^n = \left(\frac{P_{tot}}{0.74}\right)^n$,

P_{tot} - Presión atmosférica aplicada durante el envejecimiento, 0.74 atm por Laramie, Wyoming;

m, n Exponentes de presión, determinados experimentalmente para presión atmosférica constante y rápida, respectivamente;

M – Tiempo de concentración cero de sulfóxido y carbonilo, parámetro ajustado indicativo de la velocidad de envejecimiento del ligante;

T- Temperatura, °K;

t- Tiempo, días;

$[S = O + C = O]_{rtfo}$, Sulfóxido y carbonilo del ligante tras el envejecimiento por el RTFOT.

La Ecuación 19 representa la forma en que sucede la oxidación del asfalto, y es bastante precisa con respecto a las pruebas de laboratorio analizadas. Los datos que son requeridos por este modelo son las medidas de carbonilo y sulfoxido obtenido por transmisión directa de espectroscopia FTIR, mediante las alturas de los picos de cada uno de estos grupos funcionales. Para realizar la espectroscopia, se hace una dilución con 50 mg del material asfáltico por cada mililitro de tetracloruro

de carbono (CCl_4) como disolvente y en su medición proyecta una longitud de onda de 1 mm (3).

Este modelo no ha sido probado con mediciones de reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés), ya que la forma de su medición es realizada con dos números de onda diferente. Sin embargo, no quiere decir que el método no sea aplicable para dichas mediciones (3).

1.4.2.3. Metodología de Texas A&M

Este modelo es más complicado que los descritos anteriormente, y fue desarrollado por el Dr. Charles J. Glover y su equipo de investigación, en el Departamento de Ingeniería Química de Artie McFerrin en la Universidad de Texas A&M. Este método proporciona una representación precisa y clara de lo que sucede en el asfalto en el proceso de envejecimiento. El método tiene como base una ecuación diferencial parcial que representa la presión parcial del oxígeno dentro del asfalto y puede ser comparada con la concentración del oxígeno y su desarrollo se muestra en la literatura (4). Entonces en base a la relación de las ecuaciones que se representan al modelo se obtiene una ecuación general que determina el incremento del envejecimiento dentro del material asfáltico por la ecuación diferencial mostrada en la Ecuación 20, en un sistema de coordenadas cilíndricas (4).

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{O_2} \frac{\partial P}{\partial r} \right) - \left(\frac{cRT}{h} \right) r_{CA} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

P - Presión parcial de oxígeno en el asfalto;

t - Tiempo, días;

r - Distancia radial en el cálculo, relativa a los radios de los poros y la capa de la carpeta;

D_{O_2} - Difusividad del asfalto, m^2/s ;

c - Constante experimental, rango de 2.75 a 4.59×10^{-4} con una media de 3.71×10^{-4} utilizado en la mayoría de los cálculos;

R - Constante de gas ideal, $8.3144621 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{K}$;

T - Temperatura, $^\circ\text{K}$;

h - Constante de la Ley de Henry, adimensional;

r_{CA} - Tasa de área de carbonilo, CA, Crecimiento.

Sin embargo, la naturaleza compleja y el requerimiento de diferentes parámetros para la ecuación 20, hace necesaria una gran capacidad para poder resolverla y obtener la solución real, por lo que actualmente se tiene el desarrollo de la ecuación en Matlab ® y permite arrojar la solución matemática que representa la predicción del carbonilo con este sistema (4).

Uno de los parámetros que se necesitan para resolver la ecuación son medidas cinéticas del asfalto después de ser sometidas al envejecimiento y a diferentes temperaturas, y se cuantifica la oxidación que presenta en este proceso. Este método necesita de medidas de espectroscopia FT-IR para obtener el área del carbonilo (CA), en unidades arbitrarias, localizando el pico entre las longitudes de onda de 1.650 y 1.820 cm^{-1} , utilizando el espectro de absorción (4). Para ejemplificar la forma en que se toma el área en alguna de las distintas bandas de interés, por ejemplo en la banda $1000\text{-}1030 \text{ cm}^{-1}$ correspondiente al grupo funcional de sulfóxidos como se muestran la Figura 12.

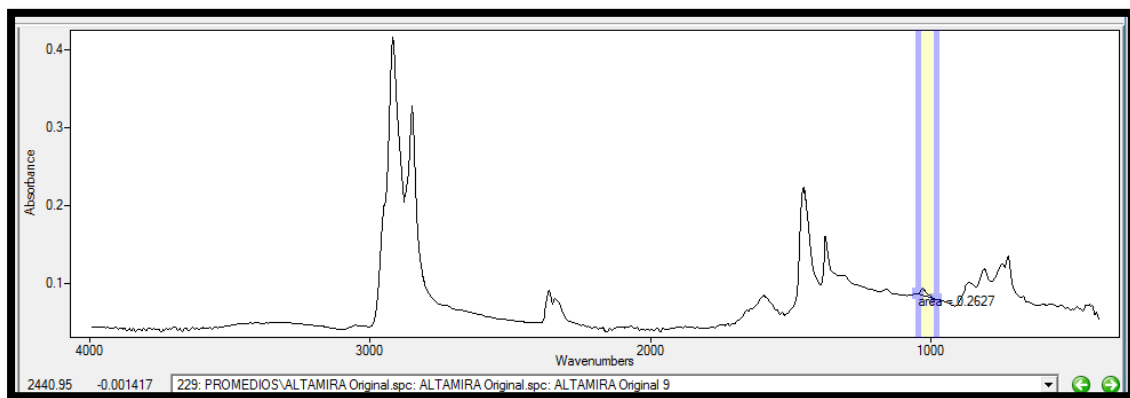


Figura 12. Ejemplo de medición de área del Sulfóxido.

La ecuación 20 incluye un parámetro cinético de velocidad constante u oxidación lenta, que son medidas cinéticas mostradas en el término de R_c , y es determinada con la ecuación 21.

$$r_{CA} = AP^{\alpha} e^{\frac{-E_{\alpha}}{RT}} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

r_{CA} - Tasa de crecimiento de área del carbonilo, CA;

A - Factor pre-exponencial;

P - Presión absoluta del oxígeno durante el envejecimiento, atm;

α - Orden de reacción con respecto a la presión de oxidación;

E_{α} - Energía de activación, J/mol;

R - Constante de gas ideal, 8.3144621 J/mol-°K;

T - Temperatura, °K.

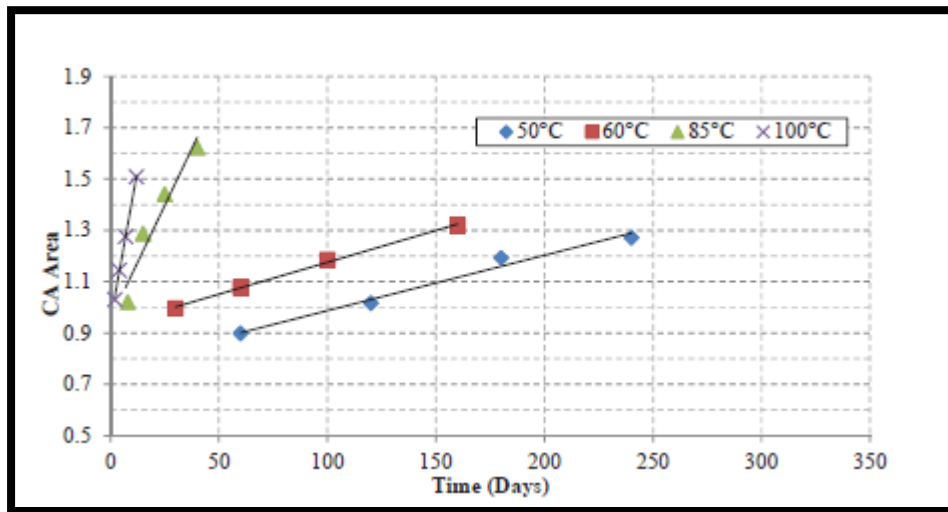


Figura 13. Ejemplo de la Medición de la Velocidad Constante del Envejecimiento.

En la Figura 13 se ejemplifican las mediciones cinéticas de velocidad constante, y se observa que su envejecimiento es lineal con el tiempo. Si se efectúa una consideración de la tasa de oxidación como inversa de la temperatura y gas ideal,

o sea, $1/RT$. Se utiliza la pendiente y un trazado de $1/RT$, la relación puede ser determinada con la ecuación de Arrhenius para la ecuación 21 como se muestra en la Figura 14 (4).

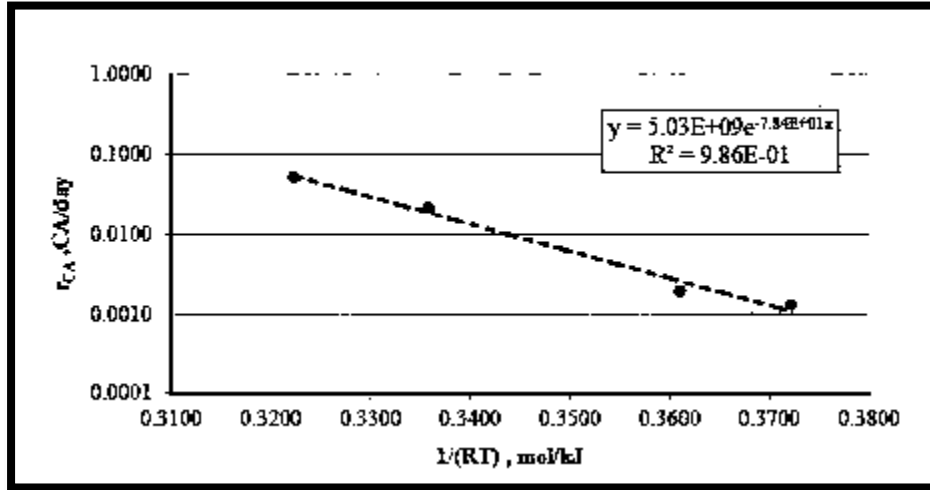


Figura 14. Gráfica que representa la ecuación de Arrhenius (4).

Específicamente el modelo Texas A&M se enfocó prioritariamente en la banda de envejecimiento del área de carbonilo y consideró innecesario el grupo funcional del sulfóxido. Otra característica a destacar del modelo es, que sugiere despreciar las medidas cinéticas de velocidad inicial o rápida, para tener una mejor eficiencia en las pruebas realizadas en laboratorio y así tomar como base las medidas de velocidad lenta o constante en la investigación. Además, la mayoría de los resultados arrojan medidas de tasa constante y teóricamente son las características que deben de controlar gran parte del proceso de envejecimiento en el asfalto (4).

Dentro del modelo se considera otro factor importante que determina la susceptibilidad al endurecimiento denominado HS, que se refiere a la rigidez del asfalto, el parámetro η_o^* relacionado con el envejecimiento y utilizando el grupo funcional carbonilo, representado en función de LSV. Lo anterior es definido por la ecuación 22 (4).

$$\ln \eta_o^* = HS * CA + m \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

η_o^* - Viscosidad baja de corte del asfalto, Poise;

HS- Susceptibilidad al endurecimiento, Poise/CA;

CA- Área de Carbonilo, CA;

m - Intercepción de $\log \eta_o^*$ y relación CA, Poise.

A través de varios estudios se ha observado que los asfaltos que contienen una composición similar, son muy parecidos en sus relaciones HS. Entonces al realizar las pruebas de envejecimiento y las mediciones cinéticas, se puede determinar el parámetro η_o^* para cada medición de área de carbonilo y obtener relaciones HS. La relación es constante debido a temperatura de envejecimiento y se determina como se muestra en el ejemplo de la Figura 15 (4).

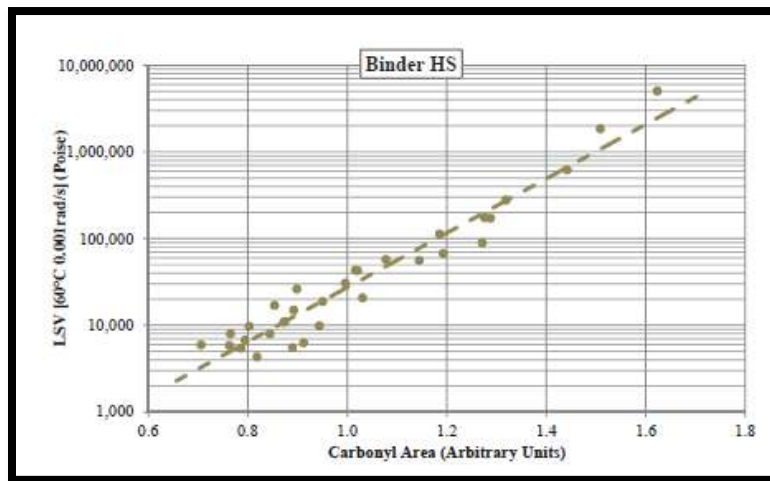


Figura 15. Ejemplo de Susceptibilidad al Endurecimiento (4).

De esta manera se pueden hacer observaciones importantes y diversos estudios en los asfaltos que se requieran estudiar. Sin embargo, aunque este factor sea de gran interés, se requiere de más parámetros a considerar para tener un buen desempeño matemático con la ecuación 20 (4).

Un factor más a considerar que se encuentra en el modelo general es la difusividad de oxígeno, que es atribuido en la obra de Reid (24). Dentro del desarrollo del modelo se encuentra determinado una relación entre la difusividad de oxígeno y la viscosidad del asfalto (25). Por ello, se ha mostrado avances en este proceso y se perfeccionó mediante experimentos más específicos y precisos dando como resultado la ecuación 23 para obtener la difusividad de oxígeno (26).

$$D_{o_2} = T * 5.21 * 10^{-12} (\eta_o^*)^{-0.55} \quad Ec. 23$$

Donde:

D_{o_2} - Difusividad de la carpeta de asfalto, m²/s;

T - Temperatura del ligante, °K;

η_o^* - Velocidad de corte limitado por la viscosidad, LSV, Pa-s.

Para que la Ecuación 20 presente resultados contundentes y precisos, se necesitan datos de un perfil térmico amplio que cumpla con las condiciones en las que se desarrolla la banda del carbonilo, ya que la temperatura que se tiene en campo se vuelve complicada conforme avanza el tiempo (4). Por ello se desarrolló un modelo que determina la temperatura superficial (Ecuación 24), en la Universidad Texas A&M basado en el modelo de crecimiento de carbonilo (26), y este se resuelve con un software que fue desarrollado en la Universidad de Nevada, Reno (27).

$$\rho C \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T_s}{\partial t} = Q_s(1 - \bar{\alpha}) + \varepsilon_\alpha \sigma T_\alpha^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 - h_c(T_s - T_\alpha) + k \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad Ec. 24$$

Donde:

ρ - Densidad del material;

C - Capacidad de calor;

ρC - Capacidad calorífica volumétrica del pavimento;

x - Profundidad de la capa de pavimento;

T_s - Temperatura de la superficie, °K;

T_a - Temperatura del aire, °K;

t - Tiempo;

Q_s - Flujo de calor debido a la radiación solar;

$\bar{\alpha}$ - Albedo de superficie del pavimento (fracción de radiación solar reflejada);

ε_a - Coeficiente de absorción del pavimento;

ε - Emisividad del pavimento;

σ - Constante de Stefan-Boltzman, $5.68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

h_c - Transferencia de calor, en función de la temperatura y velocidad del viento, $\text{W/m}^2\text{K}$;

k - Conductividad térmica de la mezcla asfáltica;

Después de obtener la temperatura en la superficie, se tiene hacer la modelación de la transferencia de calor que presenta el pavimento a través de las capas mediante la difusión térmica con la ecuación 25 (4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

T - Temperatura del pavimento, °K;

k - Difusividad térmica.

Estas ecuaciones tienen un grado de complejidad alto por lo que no se puede dar una explicación concreta de la forma en que se modela la temperatura del pavimento, así que se consideran otras opiniones en su análisis y desarrollo (26); (27). Con estos modelos se pueden determinar predicciones de temperatura en diferentes lugares en alguna sección del pavimento en un tiempo determinado, y puede ser útiles para realizar la predicción de carbonilo evaluando la oxidación del asfalto, como lo marca el lineamiento de Texas A&M.

2.0. Selección de los Asfaltos a Estudiar y Procedimientos de Prueba

2.1. Descripción y ubicación de los cinco Asfaltos utilizados

2.1.1. Refinería de Salamanca

Esta refinería fue inaugurada el 30 de julio de 1950 con el nombre de “Ing. Antonio M. Amor”, ubicada en el centro de México perteneciente al estado de Guanajuato y municipio de Salamanca ($20^{\circ}34'13''\text{N}$, $101^{\circ}11'50''\text{O}$), cuenta con 491,646 habitantes, que creció y se desarrolló rápidamente hasta convertirse en un sitio industrial y de servicios. Se estima que tiene una refinación de 217,000 barriles por día con un manejo de crudo del 15% que facilita la obtención de productos de mayor calidad y vida útil en la planta de proceso (28).



Figura 16. Ubicación de la Refinería “Ing. Antonio M. Amor” en Salamanca.

2.1.2. Refinería de Tula

Esta refinería fue inaugurada con el nombre de “Miguel Hidalgo”, localizada en el Estado de Hidalgo, en el municipio de Tula de Allende ($20^{\circ}03'23''\text{N}$, $99^{\circ}20'31''\text{O}$), al norte de la Ciudad de México, cuenta con 103,919 habitantes y sus instalaciones ocupan un área total de 749 hectáreas. Esta refinería es considerada como una de las más importantes en el país por su capacidad instalada, y la porción del mercado

que controla, ya que procesa el 24% de crudo total que se refina en México. Cuenta actualmente con una capacidad de refinación de 325,000 barriles por día (29).



Figura 17. Ubicación de la Refinería "Miguel Hidalgo" en Tula.

2.1.3. Refinería de Cadereyta

Esta refinería fue inaugurada con el nombre de "Ing. Héctor R. Lara Sosa" comenzando con su operación el 12 de Febrero de 1979, localizada en el estado de Nuevo León, en el municipio de Cadereyta Jiménez ($25^{\circ}35'26''\text{N}$, $100^{\circ}00'05''\text{O}$), al norte de México. Sus instalaciones ocupan un área total de 489.5 hectáreas, que se encuentran ubicados estratégicamente para cubrir las necesidades de energéticos de los estados de Cadereyta, Coahuila, Chihuahua y en forma parcial los estados de Durango, San Luis Potosí y Tamaulipas. Cuenta con una refinación de 235,000 barriles de crudo por día (30).



Figura 18. Ubicación de la Refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa" en Cadereyta.

2.1.4. Refinería de Salina Cruz

Esta refinería fue inaugurada en Abril de 1979 con el nombre de “Ing. Antonio Dovalí Jaime”, localizada al sureste de la Ciudad de México en el estado de Oaxaca, en el municipio de Salina Cruz ($16^{\circ}09'30''\text{N}$, $95^{\circ}01'30''\text{O}$) sobre la costa del Océano Pacífico, y cuenta con una población de 76 596 habitantes. Sus instalaciones ocupan una superficie total de 600 hectáreas, esta ha registrado un constante crecimiento que la ubica como la más grande del sistema petrolero de refinación en el contexto nacional, con capacidad de procesar 330,000 barriles de producto crudo al día (31).



Figura 19. Ubicación de la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime en Salina Cruz.

2.1.5. Refinería de Altamira

Esta refinería fue inaugurada con el nombre de “Francisco I. Madero”, localizada al Noreste de México en el estado de Tamaulipas, en el municipio de Ciudad Madero ($22^{\circ}16'35''\text{N}$, $97^{\circ}49'53''\text{O}$) en la margen del río Pánuco, casi en su desembocadura al Golfo de México. La capacidad nominal del proceso de crudo de la refinería es de 186,000 barriles por día. Los productos que se obtienen de esta refinería cubren la demanda de su zona de influencia y en ocasiones algunas se exportan (32).



Figura 20. Ubicación de la Refinería Francisco I. Madero en Altamira.

2.2. Descripción de los procedimientos de prueba

2.2.1. DSR

El Reómetro de Corte Dinámico (DSR) se utiliza para obtener los parámetros reológicos, principalmente el Módulo de Corte Dinámico en materiales con propiedades viscoelásticas, en este estudio nos enfocaremos en el asfalto. Se pueden realizar diferentes pruebas, una de ellas consiste en realizar la caracterización del asfalto, por medio de barridos de frecuencias, barridos de deformación, comprobación de parámetros reológicos, etc. Para efectuar el ensayo se requiere de una muestra de $1 \text{ o } 2 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de alto y 8 o 25 mm de diámetro, lo cual varía dependiendo de la temperatura de interés. Se mide aplicando una frecuencia (carga) en un tiempo determinado por la prueba, con temperatura constante y deformación controlada, sometiendo la muestra a esfuerzos de corte entre dos platos paralelos basados en la Norma ASTM T315-12 (ver Figura 21).



Figura 21. Reómetro de Corte Dinámico (DSR), Bohlin Instruments.

2.2.2. Penetración

El ensayo de penetración estándar es realizado en base a la Norma ASTM D5, con un Penetrómetro Universal (ver Figura 22), con el cual se obtiene una propiedad física que representa que tan blando o rígido puede ser el asfalto en una temperatura estándar. El procedimiento del ensayo es aplicando cierta carga con una aguja en diversos puntos del asfalto original en estudio, y medir la penetración. Éste parámetro es muy rápido de obtener, ya que la duración de prueba es corta y sirve para clasificar al asfalto si se utiliza el sistema basado en este ensayo o con el objetivo de conocer su dureza.



Figura 22. Penetrómetro Universal utilizado para el asfalto.

2.2.3. Punto de reblandecimiento

Esta prueba se realiza con dos anillos de bronce y dos bolas de metal con medidas y pesos específicos de acuerdo a la Norma ASTM D36-D36M-14, en el procedimiento de ensayo se incrementa la temperatura gradualmente en un medio

líquido, que contiene inmerso a la muestra de asfalto en estudio. Con este ensayo se obtiene la temperatura en la cual el asfalto se vuelve blando y tiene deformaciones importantes en su estructura como se muestra en la Figura 22. Esta es otra propiedad física, y debe de mantenerse en un rango de temperatura determinado por el grado de desempeño del asfalto.

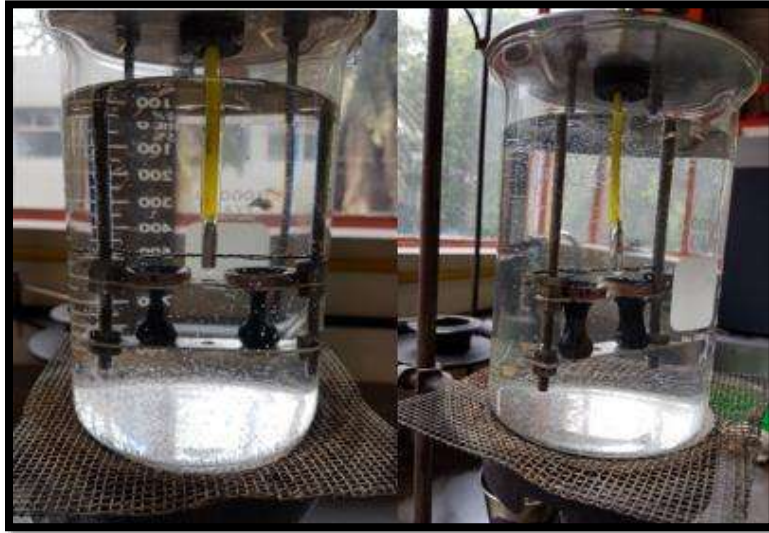


Figura 23. Prueba de Punto de Reblandecimiento de anillo y bola.

2.2.4. Viscosidad Rotacional

La viscosidad es una característica física del asfalto que nos permite conocer la consistencia necesaria para su uso en una temperatura determinada. El ensayo tiene como base la Norma ASTM D 4402-06 (ver Figura 24), la cual consiste en hacer girar una aguja a cierta velocidad y temperatura sobre una muestra de asfalto contenida en un tubo. Generalmente se utiliza para conocer la temperatura de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica en laboratorio.



Figura 24. Viscosímetro Rotacional, marca Fungilab.

2.2.5. RTFOT

El ensayo de Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO, por sus siglas en inglés) busca simular el envejecimiento a corto plazo en el asfalto y se realiza con base en la Norma ASTM D2872-12 (ver Figura 25). Esto se hace con una porción del asfalto original de muestra, depositado en 8 vasos de vidrio, llevando a cabo una rotación previa para que el asfalto se coloque sobre las paredes y se genere una capa delgada, seguido se colocan en el carro giratorio adentro del RTFO a una temperatura de 163°C y rotación constante durante 85 minutos. Después de la prueba podemos utilizarlo para obtener las características reológicas y simular cómo se comporta el asfalto envejecido por este proceso.



Figura 25. Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), Despatch.

Es importante resaltar que una parte de la prueba consiste en calcular el porcentaje de pérdida de masa que sufre durante el proceso de envejecimiento de cualquier asfalto, para ello se toma la masa inicial de dos vasos y después del envejecimiento se toma su masa final, y el resultado se verifica con el límite permisible de pérdida especificado en la Norma de referencia. En la Figura 26 se muestran los vasos completos en reposo, para después meterlos en el RTFO y hacer la cuantificación de su cambio de masa.



Figura 26. Contenedores con asfalto para el ensayo en el RTFO.

2.2.6. PAV

El procedimiento de la prueba de Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) se basa en la Norma ASTM D6521 (ver Figura 27). Se realiza con una parte del asfalto que fue sometido a la prueba de RTFO, con el objetivo de simular el envejecimiento a largo plazo. Un aspecto que es relevante dentro de la ejecución del procedimiento es que tiene una duración de 20 horas aplicando una presión de 2.1 MPa, más las etapas anteriores que consisten en la preparación y acondicionamiento. El asfalto obtenido es de mucha utilidad para estudiar sus características reológicas en esta etapa.



Figura 27. Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), compañía Applied Test Systems Inc.

En la Figura 28 se muestra el contenedor, en el cual se colocan charolas con 50 gramos de asfalto después de ser sometidos al RTFOT. Se colocaron los asfaltos de todos los asfaltos en estudio para someterlos en el mismo proceso a envejecimiento a largo plazo.



Figura 28. Muestras después del RTFOT de las distintas Refinerías para someterlas a la prueba en el PAV.

2.2.7. BBR

La prueba de Bending Beam Reometer o Reómetro de Viga a Flexión (BBR, por sus siglas en inglés) se ejecuta con base en la Norma ASTM D6648. El asfalto que se requiere es el obtenido del PAV, con el cual se fabrican vigas con dimensiones específicas. El procedimiento de ensayo consiste en aplicar una carga en la parte central de la viga, la cual está colocada sobre dos apoyos con el objetivo de obtener su Rigidez, este proceso se realiza a temperatura controlada por medio de un baño maría y es generalmente realizada a temperaturas inferiores a 0°C. Con los parámetros obtenidos del ensayo (Rigidez y pendiente de la curva esfuerzo deformación) se determina el grado de desempeño a baja temperatura, el cual se utiliza para clasificar el asfalto en estudio.



Figura 29. Reómetro de Viga a Flexión (BBR), compañía Applied Test Systems Inc.

La fabricación de las vigas para el ensayo de BBR se lleva a cabo mediante un molde que contiene las dimensiones precisas, en la cual, se llena con el asfalto correspondiente, se enrasa y se deja enfriar. Se desmonta del molde y se obtiene la viga como se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Molde y Viga para el ensayo de BBR.

2.2.8. Espectrometría

La espectrometría es un estudio a profundidad sobre la estructura molecular que tiene algún ligante, como en la presente tesis es el asfalto. Mediante este equipo se pueden obtener los espectros en donde se puede observar los grupos funcionales que lo componen, e identificar y analizar las bandas en donde se desarrolla la

oxidación del material. Para este ensayo se requieren pequeñas muestras, y son colocadas en un diamante para que un láser obtenga sus características. Es muy útil para conocer la tasa de crecimiento del envejecimiento hasta un largo plazo.



Figura 31. Espectrómetro Thermo Nicolet 6700 FT-IR.

3.0. Estudio Reológico de los Asfaltos Seleccionados y Análisis de Resultados

Las pruebas realizadas en el presente trabajo, fueron llevados a cabo en distintos lugares, debido a que se pretendía abarcar una estudio amplio para los asfaltos que fueron seleccionados. Por ello, se hace mención de las pruebas y lugares donde fueron desarrolladas las pruebas:

La elaboración de las propiedades físicas y mediciones con el DSR fueron realizadas en Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Algunas de las mediciones restantes en un equipo distinto de DSR, y la caracterización de BBR se llevaron a cabo en la Empresa ROCHER Ingeniería S.A. de C.V.

Las mediciones en el IR se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería, UNAM, con certificación ISO 9001:2008 vigente al 11 de enero de 2019.

3.1. Propiedades Físicas

3.1.1. Penetración

La penetración fue realizada en varios puntos de una misma muestra para cada refinería, proceso que se realizó por duplicado, con el objetivo de obtener resultados confiables, disminuyendo la dispersión en el ensayo. En la Figura 32, se observan los valores de penetración obtenidos para los distintos asfaltos en estudio. Como se puede ver el asfalto proveniente de la Refinería de Cadereyta presento el valor de penetración más alta, junto con la Refinería de Salina Cruz cayendo en un rango de penetración por encima de los demás. La refinería de Tula se encuentra en la posición intermedia de todas, mientras que la Refinería de Salamanca y Altamira se encuentran en el rango de penetración más bajo que todos los asfaltos en estudio.

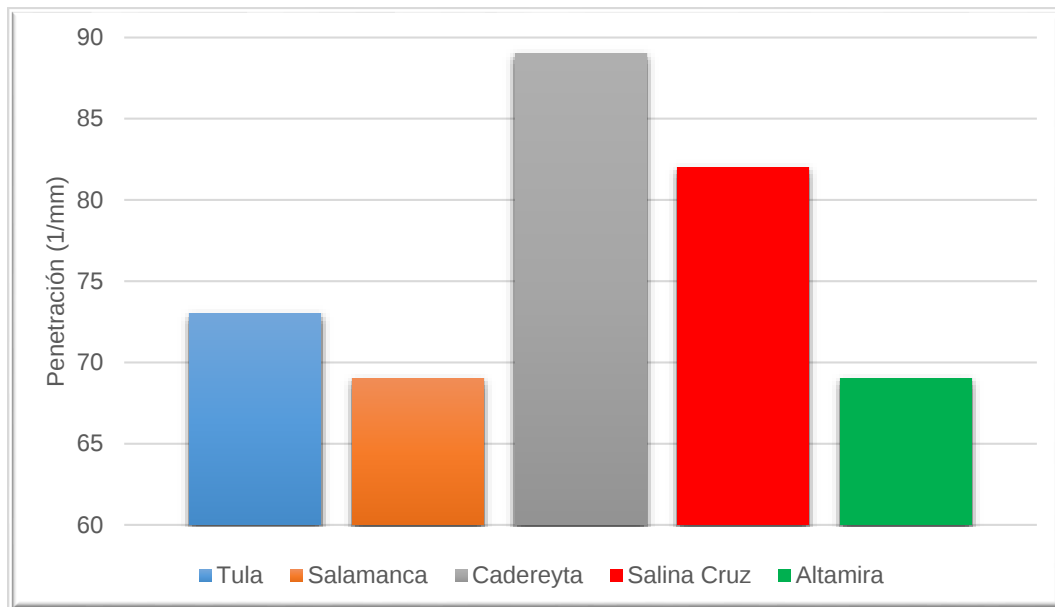


Figura 32. Resultados experimentales de la prueba de Penetración para los Asfaltos en Estudio.

En la Tabla 2, contiene la penetración promedio obtenida de las dos muestras para cada Refinería, esta propiedad física nos da a conocer su dureza. Así que, los asfaltos provenientes de Cadereyta y Salina Cruz son más blandos debido a su penetración alta, y los asfaltos de la refinería de Tula, Salamanca y Altamira resultaron ser más duros debido a que presentan un valor de penetración menor.

Tabla 2. Datos experimentales de la prueba de Penetración para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	Penetración (1/mm)
Tula	73
Salamanca	69
Cadereyta	89
Salina Cruz	82
Altamira	69

3.1.2. Punto de Reblandecimiento

En la Tabla 3 se muestra el primer ensayo realizado para todas las refinerías en donde Salamanca y Altamira tienen una resistencia a la fluencia mayor, con una

diferencia de 1°C de temperatura entre ellas, por lo que son muy similares en esta propiedad, mientras que los asfaltos de la refinería de Tula y Salina Cruz son iguales en su grado de fluencia, por último tenemos que el asfalto de la Refinería de Cadereyta resultó con el valor menor y presenta una diferencia de al menos dos grados con respecto a las otras refinerías.

Tabla 3. Datos experimentales de la prueba de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio.

Anillo	Ensayo 1				
	Tula (°C)	Salamanca (°C)	Cadereyta (°C)	Salina Cruz (°C)	Altamira (°C)
1	54	58	52	54	57
2	55	58	53	54	57

La Figura 33, muestra los resultados obtenidos del ensayo de punto de reblandecimiento, cada barra representa el valor obtenido por cada anillo. Los asfaltos de las refinerías de Salamanca, Altamira y Salina Cruz no tienen ninguna variación entre sus respectivos anillos de prueba, por otra parte, los asfaltos de las refinerías de Tula y Cadereyta tienen una diferencia de un grado de temperatura en los dos asfaltos, estando dentro del rango permisible para que la prueba sea correcta.

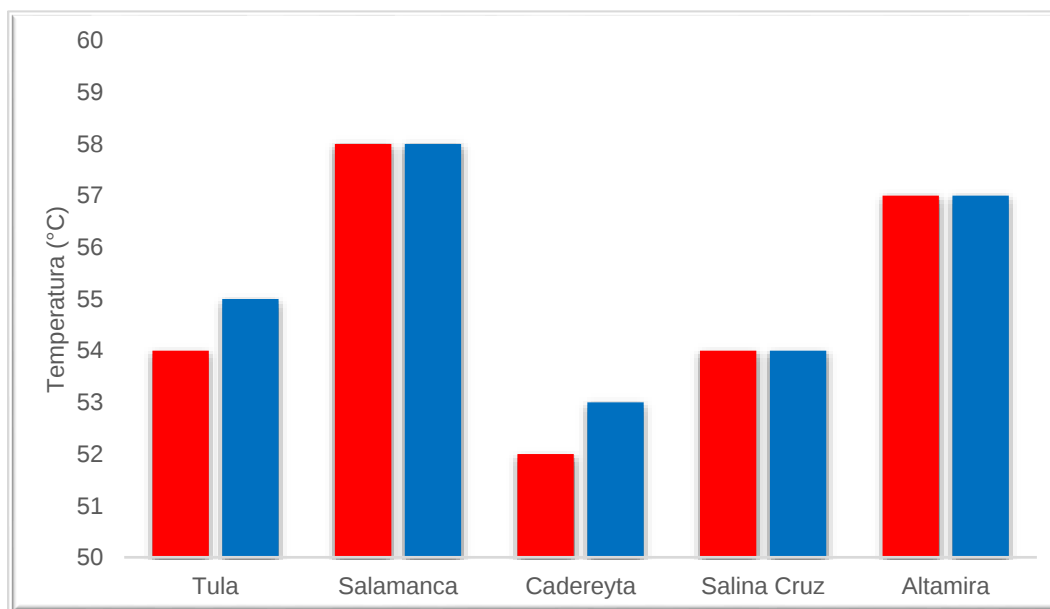


Figura 33. Resultados experimentales de la prueba de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio.

La Tabla 4, se muestran los resultados experimentales del segundo ensayo de punto de reblandecimiento. En donde, los datos obtenidos muestran que el asfalto proveniente de Salamanca tiene la temperatura a la fluencia más grande, seguido se encuentra los asfaltos de la refinería de Tula y Altamira con una temperatura 3 grados menor que la anterior y como último se encuentran los asfaltos de las refinerías de Tula y Salina Cruz con los valores más pequeños, pero en un rango más alto.

Tabla 4. Datos experimentales de la prueba 2 de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio.

Ensayo 2					
Anillo	Tula (°C)	Salamanca (°C)	Cadereyta (°C)	Salina Cruz (°C)	Altamira (°C)
1	55	57	54	54	55
2	55	57	54	54	55

En la Figura 34, se observa que en el ensayo 2 se obtuvieron resultados experimentales sin variación con respecto a los anillos del mismo asfalto, por lo cual se considera que los resultados son aceptables, debido a que se tuvo mayor precisión en los resultados.

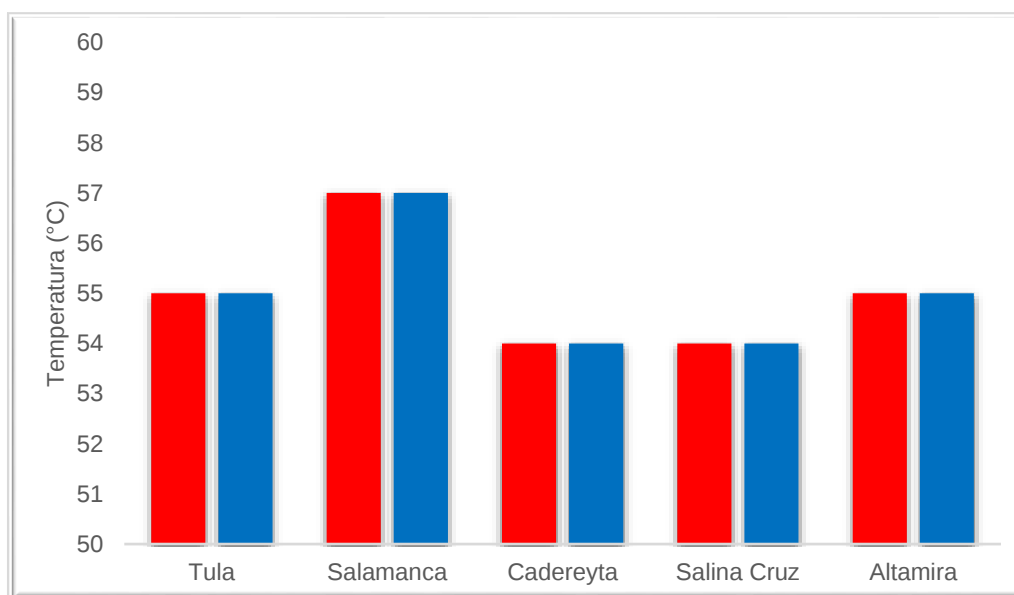


Figura 34. Resultados Experimentales de la prueba 2 de Punto de Reblandecimiento para los Asfaltos en Estudio.

3.1.3. Viscosidad Rotacional en Asfalto Original

La Tabla 5, se muestra los datos experimentales de la viscosidad de los asfaltos originales provenientes de la refinería de Tula, Salamanca, Salina Cruz, Cadereyta y Altamira, que fueron sometidos a viscosidad rotacional a varias temperaturas de prueba (90 – 160°C), en los que se observa un amplio rango de temperaturas y viscosidades que presentan cada uno de los asfaltos. Los asfaltos de las refinerías de Salina Cruz y Cadereyta tienen las viscosidades más bajas y son similares entre ellos, por otra parte, los asfaltos de las refinerías de Tula y Salamanca son muy parecidos entre ellos, pero diferente a los anteriores, lo cual se puede observar de la Tabla 5. Cabe destacar que el asfalto de la refinería de Altamira presenta un comportamiento de mayor viscosidad con respecto a los demás asfaltos, siendo su viscosidad mayor en todas las temperaturas de ensayo.

Tabla 5. Datos experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Original de los Asfaltos en Estudio.

Temperatura (°C)	Viscosidad Rotacional				
	Tula Pa·s	Salamanca Pa·s	Cadereyta Pa·s	Salina Cruz Pa·s	Altamira Pa·s
90	8.545	8.833	7.783	7.730	10.053
100	3.693	3.773	3.380	3.341	4.285
110	1.772	1.796	1.635	1.630	1.997
120	0.886	0.930	0.824	0.851	0.871
130	0.497	0.518	0.457	0.461	0.487
140	0.318	0.311	0.297	0.292	0.313
150	0.205	0.209	0.195	0.190	0.204
160	0.146	0.148	0.139	0.137	0.144

Se muestra en la Figura 35 los resultados de las viscosidades obtenidas mediante el ensayo de viscosidad rotacional a diferentes temperaturas y el rango de mezclado y compactación para una mezcla asfáltica según la recomendación del Manual del Asphalt Institute (33). Como se observa, las viscosidades están representadas en escala logarítmica en el eje vertical y los asfaltos son muy similares entre sí a simple vista, sin embargo, en los resultados mostrados anteriormente se observó que el

asfalto proveniente de Altamira presenta mayor viscosidad. Por otra parte, se puede determinar que todos presentan una misma tendencia de manera descendente conforme aumenta su temperatura.

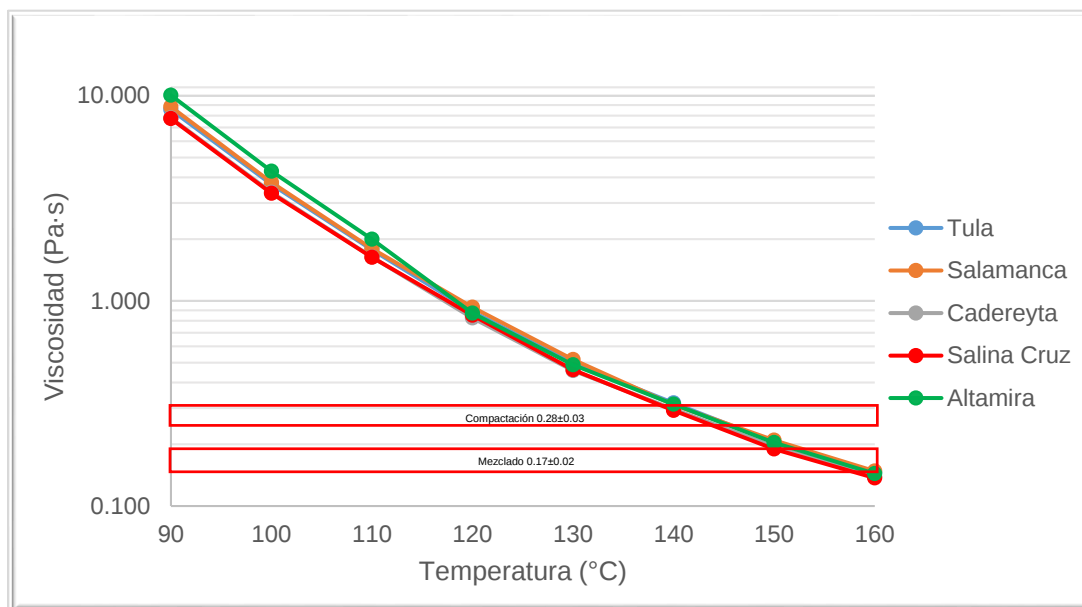


Figura 35. Resultados experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Original de los Asfaltos en Estudio.

3.1.4. Viscosidad Rotacional Después del RTFOT

La Tabla 6 muestra la viscosidad de los asfaltos sometido al ensayo del RTFO, presentando un envejecimiento a corto plazo y por lo tanto, un aumento en la rigidez. Las viscosidades de los asfaltos provenientes de Tula, Salamanca, Salina Cruz y Cadereyta, presentan a una temperatura de 90°C prácticamente el mismo valor de viscosidad, y después en la mayoría de las temperaturas son muy semejantes, sin embargo, el asfalto de la refinería de Altamira presenta valores de viscosidad diferentes con respecto a los demás asfaltos y tiende a ser mayor en todas las mediciones.

Tabla 6. Datos experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

Temperatura (°C)	Viscosidad Rotacional				
	Tula Pa·s	Salamanca Pa·s	Cadereyta Pa·s	Salina Cruz Pa·s	Altamira Pa·s
90	14.679	14.680	14.680	14.680	14.679
100	7.804	10.048	9.041	10.243	13.570
110	3.245	4.167	3.916	4.288	5.490
120	1.942	1.969	1.855	2.002	2.524
130	0.987	0.982	0.834	0.954	1.217
140	0.589	0.549	0.467	0.567	0.700
150	0.337	0.337	0.292	0.335	0.410
160	0.207	0.228	0.197	0.217	0.265

En la Figura 36 se muestran los resultados de las viscosidades obtenidos mediante el ensayo de viscosidad rotacional y los rangos en donde aplica el mezclado y compactación para una mezcla asfáltica según el Manual del Asphalt Institute (33). Se puede observar los resultados con el eje vertical en escala logarítmica, en la cual se observa que el asfalto de la refinería de Tula en su inicio presenta valores distintos con respecto a los otros asfaltos en estudio. Por otra parte, se observa que para las temperaturas de 90 y 100°C en el asfalto proveniente de la refinería de Altamira presenta una tendencia horizontal en la viscosidad, esto se debe a que en la temperatura de 90°C se superó la capacidad de torque del equipo, por lo que, se considera que este valor no es confiable y se coloca en la gráfica solo con fines ilustrativos.

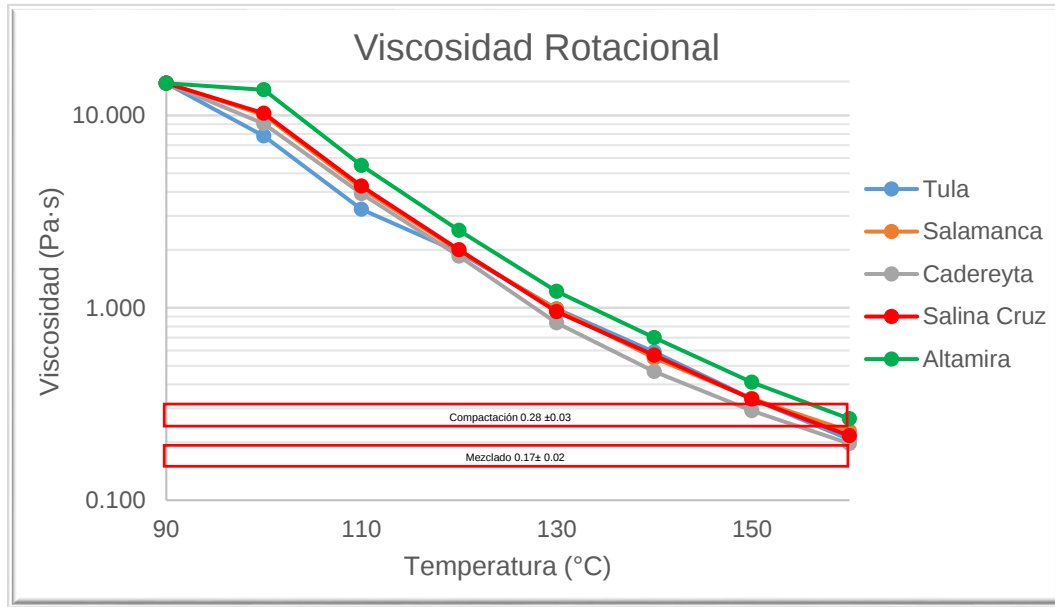


Figura 36. Resultados experimentales de la Viscosidad Rotacional para el Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

3.1.5. Cambio de masa

El cambio de masa sucede en el instante que el asfalto es sometido al ensayo de envejecimiento por RTFO, el cual provoca una volatilización en las partículas del asfalto y como consecuencia se genera una pérdida de masa. Este parámetro es obtenido mediante una ecuación establecida en el Manual del Asphalt Institute (33), utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio de Masa (\%)} = \frac{((PV+AAE)-(PV+ADE))}{((PV+AAE)-(PV))} * 100 \quad \text{Ec. 26}$$

Dónde:

PV- Peso de Vaso, gramos.

AAE- Asfalto Antes de Envejecer, gramos.

ADE- Asfalto Después de Envejecer (163°C), gramos.

A continuación se muestra en la Tabla 7 un ejemplo con los resultados obtenidos del asfalto proveniente de la refinería de Altamira.

Tabla 7. Datos experimentales del peso de los vasos para calcular el cambio de masa.

Vaso	PV (g)	PV+AAE (g)	PV+ADE (g)	Cambio Masa %
1	170.7	206.72	206.3	1.166
2	170.15	205.83	205.42	1.149
			Promedio	1.158

La Tabla 8 muestra los resultados del cambio de masa después de que los asfaltos fueron sometidos a envejecimiento a corto plazo en RFTO, los cuales, en todos los casos tienen una pérdida de masa después del ensayo por que se obtuvo una masa menor con respecto a la masa inicial, esto es, debido a que en todos los asfaltos se volatiliza un porcentaje de masa. El asfalto de la refinería de Salamanca presenta un cambio de masa menor, siendo el menos volátil, mientras los asfaltos de las refinerías de Tula, Salina Cruz y Cadereyta presenta una variación importante con respecto al de Salamanca, y sus porcentajes son muy parecidos. Por último, el asfalto proveniente de Altamira presentó el mayor porcentaje de cambio de masa, superando el valor de 1%.

Tabla 8. Datos calculados del cambio de masa para cada uno de los Asfaltos en Estudio.

Refinería	Cambio de Masa (%)
Tula	0.78
Salamanca	0.349
Cadereyta	0.651
Salina Cruz	0.821
Altamira	1.158

En la Figura 37 se observa con mayor claridad la diferencia que existe entre todos los asfaltos en estudio, como es, que el asfalto proveniente de Altamira presenta un cambio de masa por arriba de uno por ciento. Mientras que los demás asfaltos su cambio de masa es menor que uno por ciento y de forma muy relevante el asfalto de Salamanca se encuentra por abajo del promedio de todos los asfaltos.

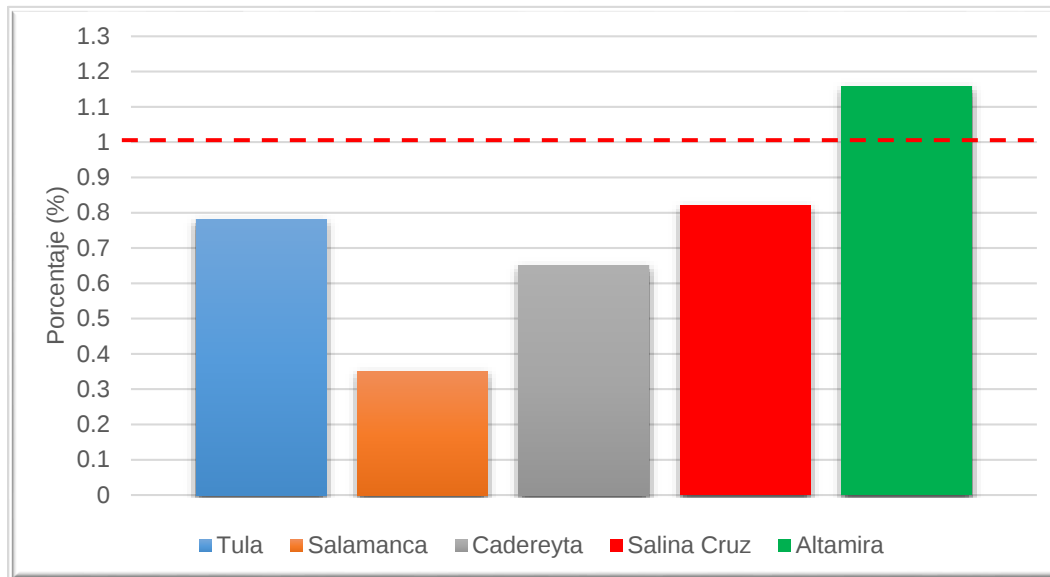


Figura 37. Resultados del cambio de masa calculado para los Asfaltos en Estudio.

3.2. Resultados Reológicos

3.2.1. Clasificación por Grado de Desempeño Original

La tabla 9, muestra la caracterización de las propiedades reológicas de los asfaltos antes de ser sometidos a cualquier envejecimiento, a esta condición se le denominará como “original” en el documento. Este proceso se realizó ensayando en un intervalo de temperaturas de 58-76°C para la determinación del grado de desempeño a la temperatura alta de los asfaltos. Los resultados de los ensayos a los asfaltos provenientes de las refinerías de Tula, Salamanca, Cadereyta y Salina Cruz determinaron que presentan un grado de desempeño de 64 grados, a diferencia del asfalto de Altamira que resultó con un grado de desempeño de 70 grados.

Tabla 9. Datos experimentales de la Clasificación por Grado de Desempeño del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.

Temp	Frecuencia	Tula	Salamanca	Cadereyta	Salina Cruz	Altamira
°C	Hz	G*/Sinδ Pa	G*/Sinδ Pa	G*/Sinδ Pa	G*/Sinδ Pa	G*/Sinδ Pa
58	1.596	4286	4327	3384	3368	4785
64	1.596	2043	1973	1549	1659	2223
70	1.596	974.7	916.1	766.1	836.6	1071
76	1.596	-	-	-	-	545.7

En la Figura 38 se muestra los resultados de las propiedades reológicas de los asfaltos y la tendencia de cada uno, con respecto a las diferentes temperaturas de ensayo. Se observa que los asfaltos de Salina Cruz y Cadereyta tienen una caracterización muy semejante por lo cercano de las líneas, y de igual manera las propiedades reológicas de los asfaltos de Salamanca y Tula son similares, sin embargo, todos los asfaltos mencionados corresponden al mismo grado de desempeño (64°C). Por último, el asfalto de Altamira presenta un mejor desempeño en sus propiedades, siendo diferente a los anteriores.

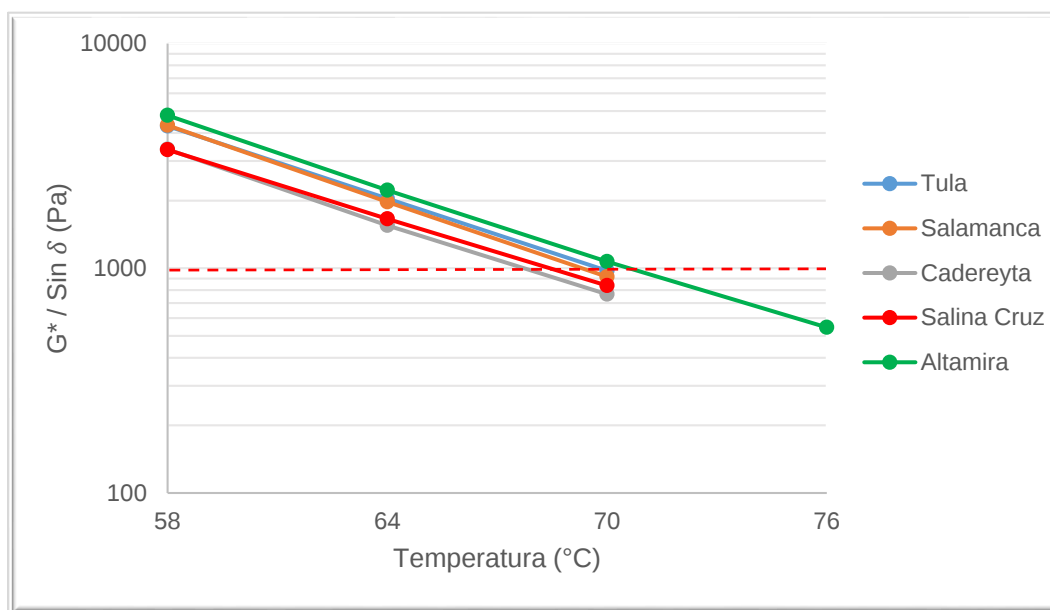


Figura 38. Resultados experimentales de la Clasificación por Grado de Desempeño del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.

3.2.2. Grado de Desempeño después del RTFOT

En la Tabla 10, se muestran los resultados experimentales de los asfaltos provenientes de las distintas refinerías en estudio, con las diferentes temperaturas utilizadas (58-76°C) y con el parámetro reológico ($G^*/\sin\delta$) utilizado para la caracterización de los ligantes asfálticos. Las propiedades que se obtuvieron de cada asfalto presentan una similitud en los distintos valores de las temperaturas, alcanzando todos hasta los 76°C sin excepción.

Tabla 10. Datos experimentales del Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

Temp	Frec	Tula	Salamanca	Cadereyta	Salina Cruz	Altamira
°C	Hz	G*/Sinδ (Pa)	G*/Sinδ (Pa)	G*/Sinδ (Pa)	G*/Sinδ (Pa)	G*/Sinδ (Pa)
58	1.596	15370	17730	11290	14250	15880
64	1.596	7092	7927	5332	6231	7927
70	1.596	3142	3541	2502	3000	3969
76	1.596	1558	1673	1226	1725	2009

Sin embargo, en la Figura 39 se observa que la tendencia en los asfaltos cambió un poco, debido a que fueron sometidos al envejecimiento por el RTFOT. Además, todos los asfaltos en estudio pasan a ser menores que el límite del parámetro $G^*/\text{Sin}\delta$ 2200 Pa en la misma temperatura de ensayo (76). Por otra parte, los cruces que hay entre cada línea de caracterización de los asfaltos provenientes de Salina Cruz y Tula en las temperaturas de 70-76, y el cruce entre los asfaltos de las refinerías de Altamira y Salamanca en las temperaturas 64-70, son debido a la baja sensibilidad del DSR con el que se realizaron las pruebas.

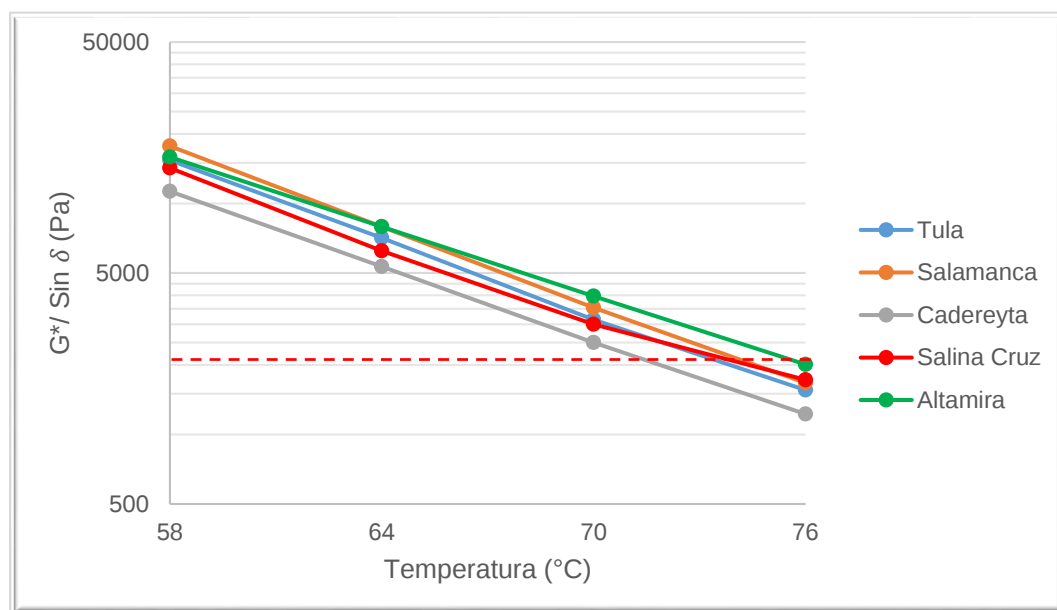


Figura 39. Resultados experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

3.2.3. Grado de desempeño después de PAV

En la Tabla 11, se muestran los resultados experimentales de los asfaltos de las refinerías de Tula, Salamanca, Cadereyta, Salina Cruz y Altamira después de ser sometidos al envejecimiento a largo plazo en el PAV. La caracterización de las propiedades reológicas se desarrolla en las temperaturas intermedias en un rango de 31-17 °C. Se observa que el asfalto proveniente de Salamanca es el único que cumple con el parámetro G^* - $\sin \delta$ a los 22°C, mientras que los asfaltos de Tula y Salina Cruz proceden hasta los 19°C, y el asfalto de Altamira y Cadereyta finalmente llegan hasta los 16 °C.

Tabla 11. Datos experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

Temp	Frecuencia	Tula	Salamanca	Cadereyta	Salina Cruz	Altamira
°C	Hz	$G^* \cdot \sin \delta$ Pa	$G^* \cdot \sin \delta$ Pa	$G^* \cdot \sin \delta$ Pa	$G^* \cdot \sin \delta$ Pa	$G^* \cdot \sin \delta$ Pa
31	1.596	2102000	2218000	1582000	1722000	1240000
28	1.596	2736000	3009000	2074000	2209000	1738000
25	1.596	3577000	4001000	2624000	3003000	2411000
22	1.596	4613000	5301000	3373000	3916000	3242000
19	1.596	5956000		4326000	5105000	4235000
16	1.596			5424000		5316000

La Figura 40, muestra que los datos experimentales de las propiedades reológicas después de haber sido sometidos a PAV. Se observa una tendencia similar entre los asfaltos en estudio, sin embargo, tienen una separación notoria entre cada línea que representa las características reológicas de los asfaltos. Los asfaltos provenientes de las refinerías de Cadereyta y Altamira se encuentran separados al comienzo en la temperatura de 31°C y conforme va disminuyendo la temperatura se van juntando hasta estar muy cercanas entre sus líneas en la temperatura de 16°C. Por otra parte, el comportamiento del asfalto proveniente de la refinería de Salamanca alcanza una temperatura de 22°C rebasando el límite del parámetro $G^*/\sin \delta$ de 5,000 kPa, mientras que los asfaltos provenientes de las refinerías de Tula y Salina Cruz alcanzan una temperatura de 19°C pasando el límite mencionado anteriormente, y por último se encuentran los asfaltos provenientes de las refinerías

de Altamira y Cadereyta pasando en una temperatura de 16°C llegando arriba del mismo límite.

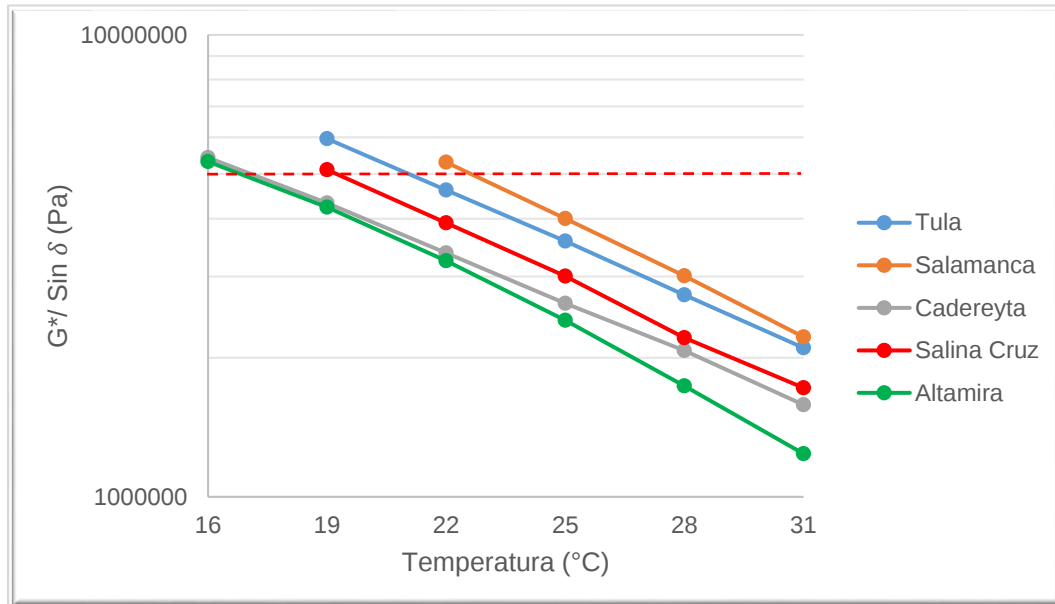


Figura 40. Resultados experimentales para el Grado de Desempeño del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

3.2.4. Caracterización por BBR

La tabla 12, muestra los resultados de la caracterización reológica de los asfaltos en estudio, siendo de mayor importancia la Rigidez Medida y su pendiente, siendo estos, los parámetros a revisar de los resultados obtenidos. Los asfaltos fueron evaluados en dos temperaturas bajas, las cuales fueron de -6 y -12 °C, y haciendo la medición a los 60 segundos de cada ensayo para confirmar el grado de desempeño de la temperatura inferior. Los datos obtenidos de las pruebas nos demuestran que en los asfaltos provenientes de las refinerías de Tula, Salamanca y Salina Cruz tienen una pendiente mayor o igual a 0.30 a los -6°C de temperatura, diferenciando que los asfaltos de Altamira y Cadereyta presentan una pendiente igual o mayor a 0.30 hasta los -12°C.

Tabla 12. Datos experimentales completos de la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	Temp	Tiempo	Carga	Defl	Rigidez Medida	Rigidez Estimada	m-value
	°C	s	mN	mm	MPa	MPa	
Tula	-6	60	974.5	1.3397	59.3451	59.2702	0.334219
	-12	60	975.8	0.5691	139.8794	139.8959	0.294684
	-12	60	974.3	0.5818	136.6171	136.258	0.289161
Salamanca	-6	60	987.3	0.9662	83.3648	83.2869	0.301769
	-12	60	977.1	0.4707	169.3441	169.1764	0.264546
	-12	60	983.3	0.4665	171.9556	171.8783	0.26142
Salina Cruz	-6	60	980.2	1.385	57.7363	57.7516	0.318528
	-12	60	975.8	0.7465	106.644	106.6036	0.287389
	-12	60	972.9	0.7437	106.732	106.7092	0.303844
Cadereyta	-6	60	974.3	1.7906	44.3938	44.3613	0.345389
	-12	60	978.2	0.7766	102.7565	102.6352	0.294345
	-12	60	974.3	0.8593	92.5078	92.4728	0.30689
Altamira	-6	60	976.9	1.7455	45.6621	45.651	0.356333
	-6	60	973.6	1.8559	42.8015	42.7915	0.360802
	-12	60	974.4	0.9124	87.1332	87.0638	0.310013
	-12	60	978.4	0.7869	101.4419	101.3495	0.311514

En la Tabla 13, se muestran los resultados experimentales del grado de desempeño para la temperatura inferior en un formato concreto. Se observa que para la temperatura de ensayo, predominaron los -6°C para los asfaltos provenientes de Tula, Salamanca y Salina Cruz, y para los asfaltos provenientes de la refinería de Altamira y Cadereyta cumplen a los -12°C. Para la rigidez medida se encuentran muy dispersas entre sí, siendo el de mayor rigidez el asfalto proveniente de Cadereyta, por debajo de éste los asfaltos de Altamira y Salamanca, por último siendo los asfaltos con menor rigidez los provenientes de Tula y Salina Cruz.

Tabla 13. Resumen de los datos experimentales para la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	Temp Ensayo	Rigidez Medida	m	PG
	°C	Mpa		
Tula	-6	59.3451	0.334219	-16
Salamanca	-6	83.3648	0.301769	-16
Salina Cruz	-6	57.7363	0.318528	-16
Cadereyta	-12	97.63	0.30062	-22
Altamira	-12	87.1332	0.310013	-22

En la Figura 41 se muestra el grado de desempeño para la temperatura inferior de los asfaltos en estudio. Se observa que los asfaltos provenientes de la refinería de Tula, Salamanca y Salina Cruz presentan un grado de desempeño de PG -16 y los asfaltos provenientes de la refinería de Altamira y Cadereyta corresponden a un PG -22. Algunos de los valores se encuentran muy cercanos al límite de 0.30, a pesar de ello, se considera realizar otro ensayo que compruebe que con la siguiente temperatura alcance o supere el parámetro de la pendiente mayor al límite.

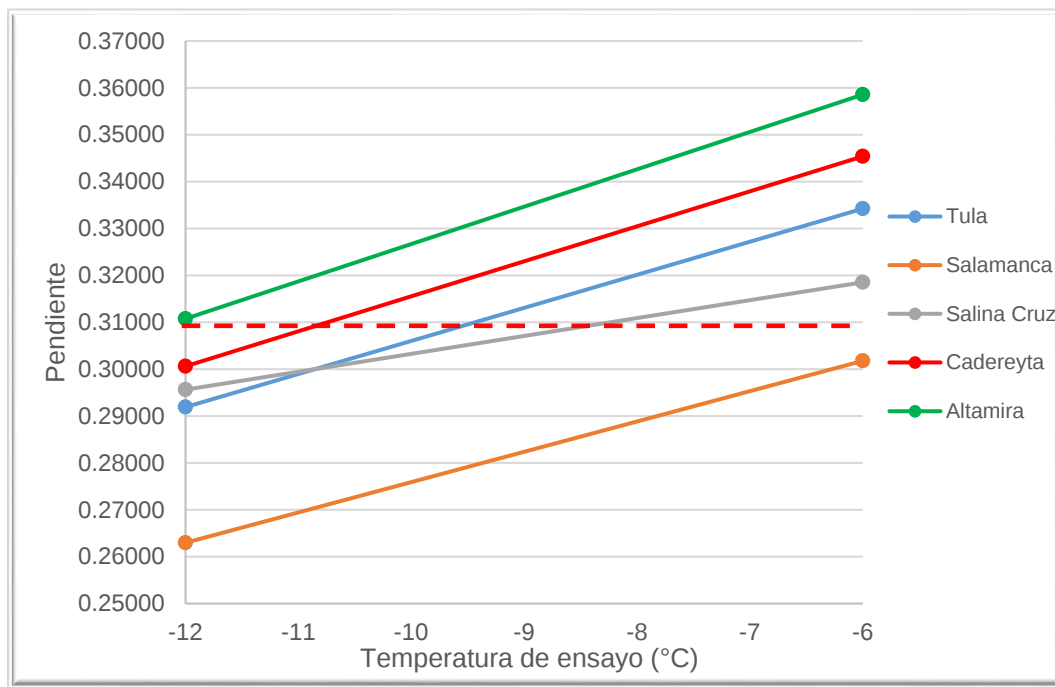


Figura 41. Resultados experimentales para la Caracterización por BBR del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

3.2.5. Curvas Maestras

Una forma de análisis para medir las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos, es usualmente por pruebas oscilatorias a través del DSR. Las pruebas en este equipo son realizadas en un amplio rango de frecuencias y temperaturas, para una completa caracterización de las propiedades viscoelásticas de los ligantes asfálticos. Por ello, se utilizó como herramienta el modelo MHN para representar su

comportamiento con los parámetros reológicos ($|G^*|$, δ , etc.) a diferentes temperaturas y frecuencias en el rango LVE. Los coeficientes del modelo se pueden determinar usando una minimización no lineal con la siguiente función objetivo:

$$f_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{|G^*|_{med,i} - |G^*|_{est,i}}{|G^*|_{med,i}} \right)^2} + \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial_{med,i} - \partial_{est,i}}{\partial_{med,i}} \right)^2} \quad Ec. 27$$

Dónde: $|G^*|_{med,i}$ y $\partial_{med,i}$ = módulo de corte dinámico y ángulo de fase, respectivamente, medidos a la i th condición de frecuencia y temperatura; $|G^*|_{est,i}$ y $\partial_{est,i}$ = módulo de corte dinámico y ángulo de fase, respectivamente, estimados usando el modelo seleccionado para la i th condición de prueba; N es el número de puntos de datos del módulo de corte dinámico.

El ajuste de la función objetivo se realizó por medio de la función SOLVER incluida en el software Microsoft Excel®, se observó que si no se seleccionaban de forma correcta los valores iniciales la función objetivo se estancaba en un valor mínimo y no se ajustaba más. Para corregir este problema, se seleccionaron los valores iniciales por tipo de asfalto que se estuviera analizando, utilizando los valores propuestos por Zhao *et al.* (19). En este estudio, el factor de desplazamiento tiempo-temperatura es modelado como una función de la temperatura utilizando la Ecuación de Williams–Landel–Ferry (WLF) (34).

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad Ec. 28$$

En dónde: C_1 y C_2 = coeficientes del modelo; T_0 = temperatura de referencia.

Se utilizó el modelo líquido viscoelástico para construir las curvas maestras y se utilizó una temperatura de referencia de 40°C. Los coeficientes del modelo obtenidos durante el proceso de ajuste se muestran en las Tablas 14, 15 y 16. Las Figuras 42, 44, 46, 48 y 50 muestran que las distintas curvas maestras se ajustan a

los datos experimentales, por lo que, se considera que el modelo simula el comportamiento del asfalto con una precisión muy buena.

Las Figuras 42 y 43, representan las curvas maestras del asfalto de la refinería de Cadereyta en sus tres estados, que son: original, envejecido a corto plazo y con envejecimiento a largo plazo; adicionalmente se compara el ángulo de fase únicamente en estado original contra su estado envejecido a corto plazo, esto debido a que no se tiene el ángulo de fase envejecido a largo plazo, debido a limitaciones del torque del equipo, el cual fue rebasado, por lo cual, los resultados no son confiables para poder realizar una comparación con las distintas condiciones. Por esta razón, los asfaltos en estudio, no cuentan con los datos experimentales de ángulo de fase en la etapa de envejecimiento a largo plazo.

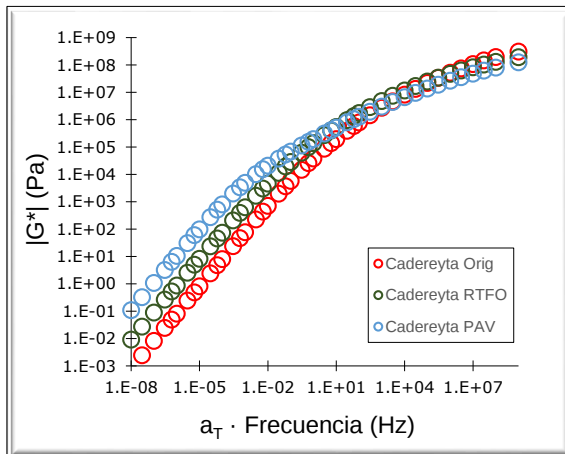


Figura 42. Curva Maestra $|G^*|$ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta.

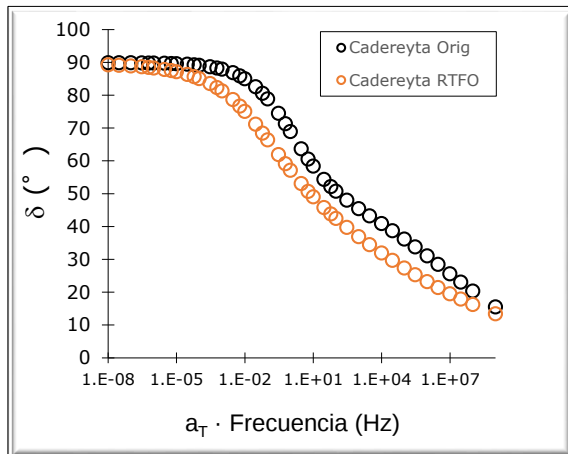


Figura 43. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta.

Así mismo, se observa el comportamiento del asfalto en sus distintas etapas a través del módulo de corte complejo (G^*), cuando se encuentra de manera virgen tiene módulos dinámicos de corte menores y conforme se va envejeciendo presenta módulos mayores, lo que nos dice, que va haciéndose mas rígido en cada etapa. Específicamente en el ángulo de fase, sucede de manera contraria, de modo que mediante el proceso de envejecimiento va disminuyendo el ángulo de fase, lo que representa una pérdida de elasticidad del material.

En las Figuras 44 y 45, se muestran los datos experimentales del asfalto de la refinería de Altamira en las distintas etapas de envejecimiento. Se observa que el asfalto presenta la misma curva, y el módulo de corte va incrementando conforme avanza el envejecimiento, creando una similitud en la forma de su comportamiento. Cabe destacar, que el ángulo de fase en el asfalto original es mayor, y conforme presenta su envejecimiento se disminuye.

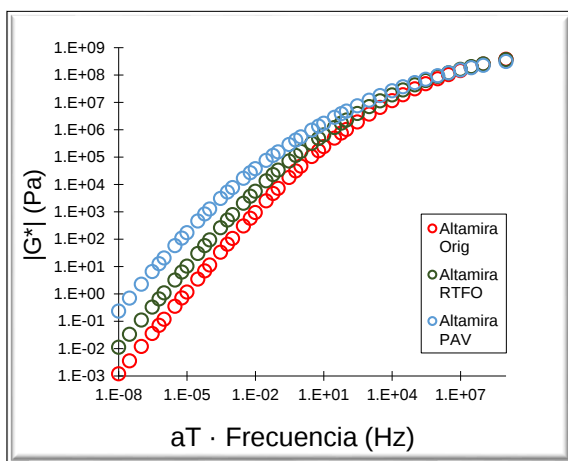


Figura 44. Curva Maestra $|G^*|$ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira.

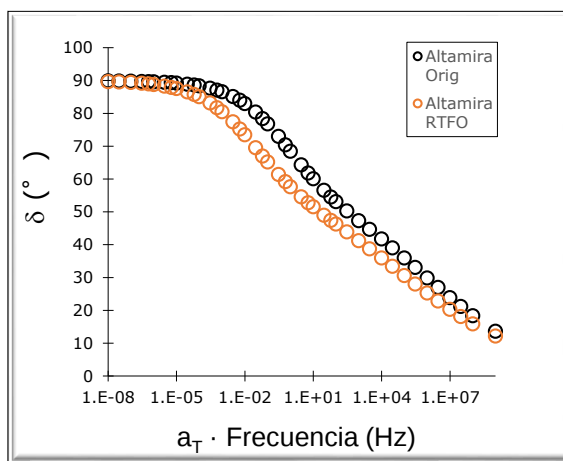


Figura 45. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira.

Las Figuras 46 y 47, muestran las curvas maestras experimentales del módulo de corte dinámico y el ángulo de fase respectivamente para el asfalto proveniente de la refinería de Tula. Para el caso del módulo de corte se observa una dispersión en los datos del asfalto envejecido por PAV cuando presenta las frecuencias más altas respecto a las otras curvas de los asfaltos originales y sometidos al RTFOT. Sin embargo, se muestra que el ángulo de fase pasa por encima de los datos del asfalto original de Tula, esto sucede porque la sensibilidad del equipo no permite determinarlo de forma exacta debido a que son muestras más rígidas.

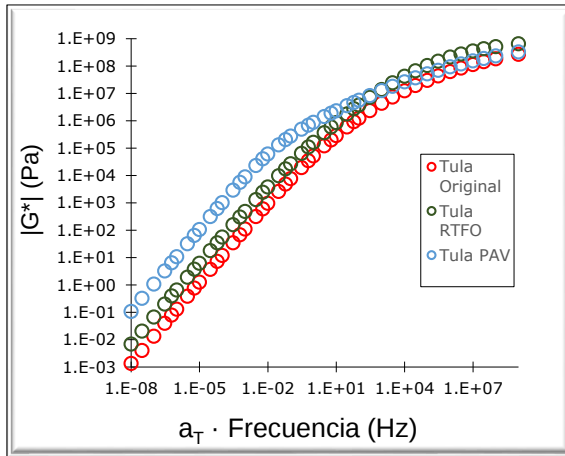


Figura 46. Curva Maestra $|G^*|$ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula.

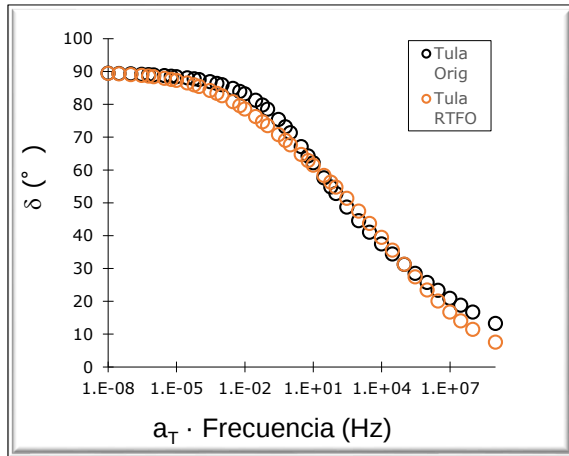


Figura 47. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula.

En las Figuras 48 y 49, se observan los datos experimentales del módulo de corte y el ángulo de fase respectivamente para el asfalto proveniente de la refinería de Salamanca. En el módulo de corte, se aprecia un comportamiento adecuado del modelo MNH, la tendencia del asfalto es incremental con respecto al módulo de corte conforme se genera mayor envejecimiento. Por otro lado, el ángulo de fase para el asfalto en estado original es mayor que cuando ha sido envejecido a corto plazo, y presentan una tendencia muy similar.

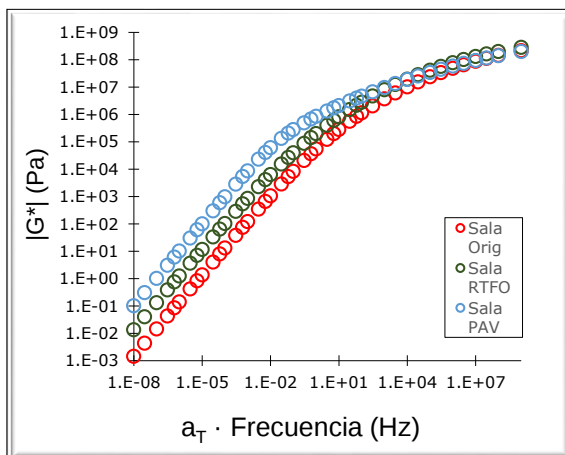


Figura 48. Curva Maestra $|G^*|$ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca.

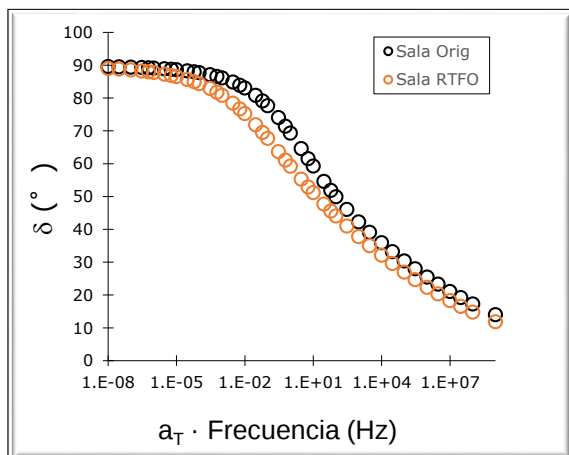


Figura 49. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca.

En las Figuras 50 y 51, se observan los datos experimentales del módulo de corte y ángulo de fase respectivamente para el asfalto refinado en la planta de Salina Cruz. El módulo de corte se aprecia claramente que el asfalto envejecido por el RTFOT pasa por arriba de los demás asfaltos y cambia su comportamiento a lo largo de la frecuencia reducida, mientras que el asfalto en estado original y sometido a PAV presenta un comportamiento similar, teniendo un aumento del módulo de corte conforme tiene un mayor envejecimiento. Además, el ángulo de fase presenta una dispersión muy notoria en los datos, y la razón de ello es, que el equipo en el fueron realizadas las pruebas tiene una sensibilidad muy limitada, por lo que, no permite medir con claridad el ángulo de fase. Sin embargo, el ángulo de fase del asfalto original presenta un comportamiento adecuado.

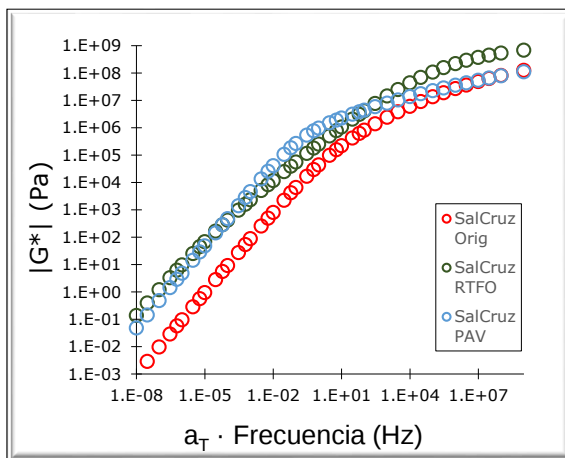


Figura 50. Curva Maestra $|G^*|$ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz.

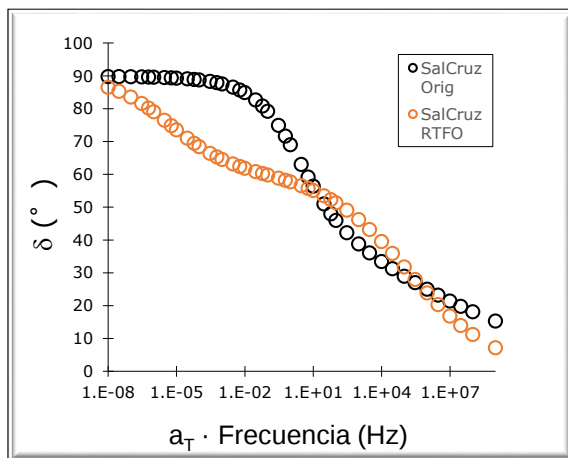


Figura 51. Curva Maestra δ del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz.

3.2.5.1. Curvas Maestras del Asfalto Original

En la Figura 52, se muestra el módulo de corte de los asfaltos provenientes de las distintas refinerías en estudio, se observa un comportamiento muy similar a lo largo de todas las frecuencias reducidas, a excepción del asfalto proveniente de Salina Cruz presenta una dispersión en las frecuencias más altas.

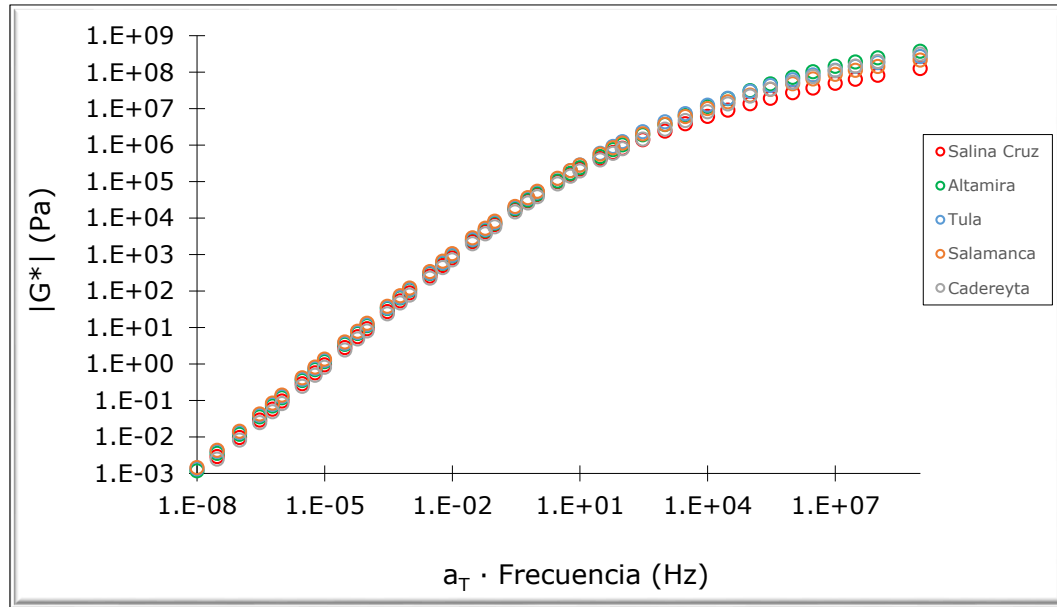


Figura 52. Curvas Maestras $|G^*|$ del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.

En la Tabla 14, se muestran los coeficientes que caracterizan a cada curva maestra para los asfaltos en estudio. Los coeficientes de correlación del módulo de corte son muy cercanos a 1, por lo que, presenta una buena correlación de los datos experimentales y los calculados por el modelo. Los demás coeficientes varían entre ellos, ya que se ajustan de manera diferente para cada asfalto.

Tabla 14. Coeficientes de ajuste del modelo MHN del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	α	β	ψ_f	ω_0	C1	C2	R^2	R	Error
Tula	0.1212	8.2496	6.6991E-06	3425.17	13.62	150.59	0.95	0.98	0.01
Salamanca	0.1098	9.1087	6.5652E-06	1366.11	16.64	189.28	0.98	0.99	0.01
Salina Cruz	0.0905	11.0540	1.0252E-05	170.63	32.41	408.76	0.92	0.96	0.02
Cadereyta	0.1748	3.4088	1.2273E-05	39273692.03	22.49	272.96	0.93	0.96	0.02
Altamira	0.1747	3.8043	8.4745E-06	6230365.76	11.63	129.02	1.00	1.00	0.02

3.2.5.2. Curvas Maestras de los Asfaltos después del RTFOT

En la Figura 53, se muestra el módulo de corte de los asfaltos después de haber sido sometidos al RTFOT de las distintas refinerías, se observa que los asfaltos provenientes de Altamira, Tula, Salamanca y Cadereyta presentan un

comportamiento muy similar entre ellos, por otra parte, el asfalto proveniente de Salina Cruz presenta una dispersión en su comportamiento respecto a los asfaltos mencionados.

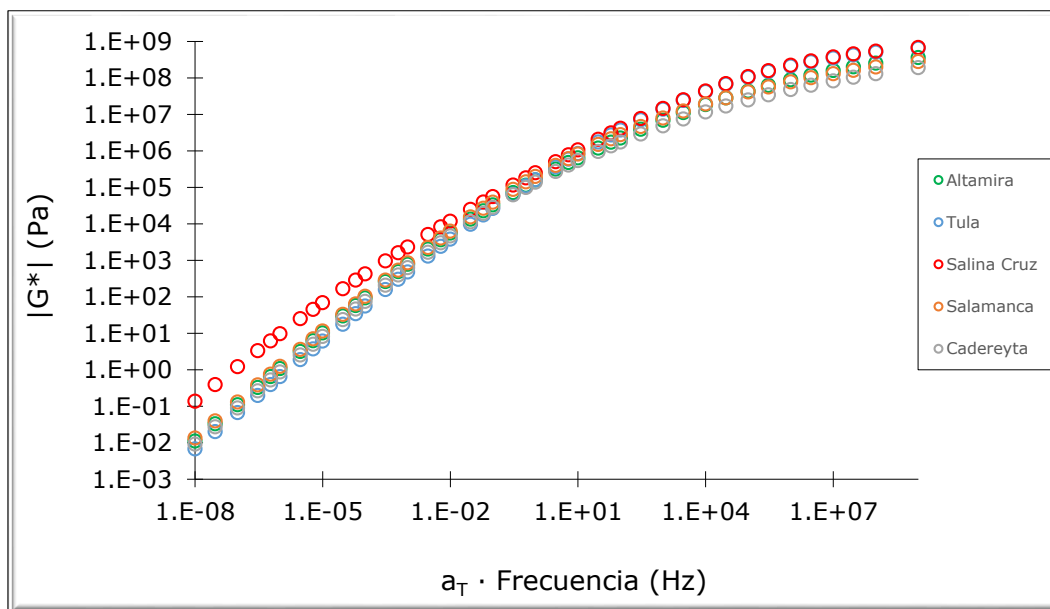


Figura 53. Curvas Maestras $|G^*|$ del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

En la Tabla 15, se muestran los coeficientes que caracterizan cada curva maestra de los distintos asfaltos después de ser sometidos al RTFOT. Los coeficientes de los modelos son diferentes entre todos los asfaltos, pero a pesar de ello, presentan una correlación del módulo de corte de los datos experimentales y los del modelo de 1 o muy cercanos. Además, el error entre los datos es mínimo o igual a 0, por lo que el ajuste es óptimo.

Tabla 15. Coeficientes de ajuste del modelo MHN del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	α	β	ψ_f	ω_0	C1	C2	R^2	R	Error
Tula	0.2061	3.6398	1.44992E-06	306763.41	17.66	202.12	1.00	1.00	0.00
Salamanca	0.1118	8.9407	6.47165E-07	326.63	19.99	203.90	0.98	0.99	0.01
Salina Cruz	0.2249	3.0237	6.42697E-08	900979.58	11.29	170.15	0.96	0.98	0.03
Cadereyta	0.0985	10.1539	1.02586E-06	147.47	25.50	309.76	0.97	0.99	0.02
Altamira	0.1490	4.6411	8.98017E-07	504833.26	14.25	148.86	1.00	1.00	0.01

3.2.5.3. Curvas Maestras de los Asfaltos Después de PAV

En la Figura 54, se muestra el módulo de corte de los asfaltos después de ser sometidos a PAV de las distintas refinerías. Se observa que los datos experimentales de los asfaltos provenientes de Tula y Altamira se asemejan en la curva maestra. Por otra parte, los datos de asfaltos provenientes de Salina Cruz y Salamanca presentan una similitud en su curva maestra, mientras que la curva maestra del asfalto de Salamanca se comporta de una manera muy diferente en todas las temperaturas y frecuencias con respecto a todos los asfaltos, siendo la más dispersa en sus datos.

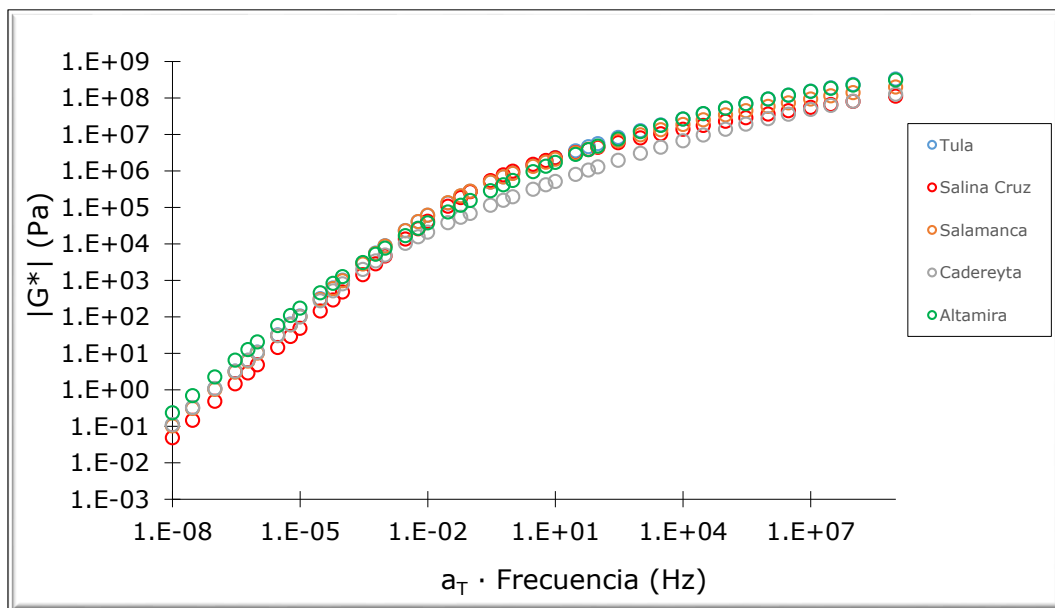


Figura 54. Curvas Maestras $|G^*|$ del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

En la Tabla 16, se muestran los coeficientes que caracterizan a las curvas maestras de los distintos asfaltos después de sometidos a PAV. Se observa que los coeficientes varían entre ellos de una forma totalmente diferente, sin embargo, los coeficientes de correlación de los datos experimentales y los del modelo son iguales a 1 o muy cercanos, por lo que el modelo presenta un muy buen ajuste. Además, los errores son muy aproximados a cero, lo que nos arroja un ajuste óptimo en todos los casos.

Tabla 16. Coeficientes de ajuste del modelo MHN para el Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

Refinería	α	β	ψ_f	ω_0	C1	C2	R^2	R	Error
Tula	0.1390	3.3152	9.39688E-08	9127388.24	16.01	155.19	0.98	0.99	0.02
Salamanca	0.1008	4.8666	9.90872E-08	658942.444	16.19	153.94	0.99	1.00	0.01
Salina Cruz	0.0764	5.4903	2.09268E-07	579833.714	41.73	484.94	0.96	0.98	0.02
Cadereyta	0.1060	4.8492	9.21726E-08	17212153.4	25169.82	328511.30	0.98	0.99	0.01
Altamira	0.1154	6.4356	4.10427E-08	5973.80307	16.90	165.11	1.00	1.00	0.01

3.3. Resultados del Infrarrojo FTIR

Los espectros obtenidos de la espectrometría de infrarrojo por la Transformada de Fourier se procesó mediante un programa con la versión de prueba con el nombre de “EssentialFTIR”, en el cual, se realizó el análisis de los espectros, así como la cuantificaron de las áreas y los picos correspondientes al grupo funcional de sulfóxidos en estudio.

3.3.1 Espectros de los Asfaltos

3.3.1.1. Asfalto Proveniente de Altamira

En la Figura 55, se muestran los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Altamira en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa en la banda de interés (1030 aproximadamente) que el pico va aumentando conforme se va presentando el envejecimiento. Además, los asfaltos con envejecimiento por PAV y PAV a 40 horas se encuentran muy juntos en los picos, siendo muy poca su diferencia. Adicionalmente, a lo largo de los espectros presentan dispersiones notables, pero no son de importancia, ya que únicamente nos basamos en la banda de los sulfóxidos en todos los estudios.

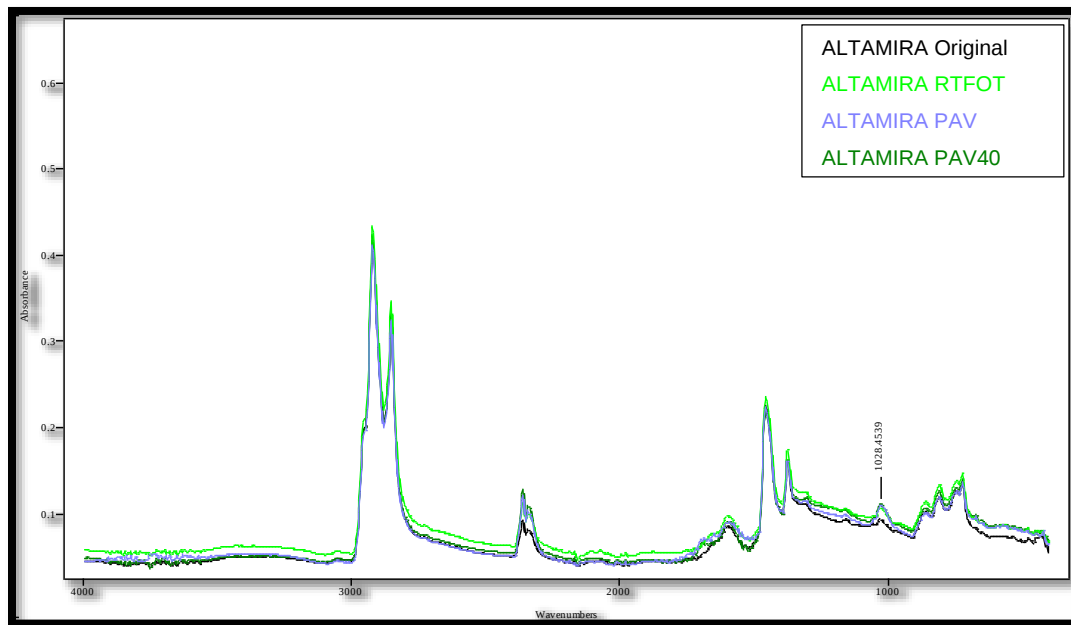


Figura 55. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.1.2. Asfalto Proveniente de Cadereyta

En la Figura 56, se muestran los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Cadereyta en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa que en la banda de los sulfóxidos (1030) el asfalto original y el asfalto sometido a PAV a 40 horas se encuentran en la misma posición de pico, lo que indica que la medición efectuada en el asfalto original presenta una variación muy importante debido a las distintas condiciones en que fue realizada. Sin embargo, los espectros que corresponden a los asfaltos sometidos al RTFOT, PAV y a PAV a 40 horas, tienen un buen comportamiento, presentando un aumento de pico conforme es sometido a un mayor envejecimiento. Además, el asfalto con envejecimiento por el RTFOT y PAV se encuentran muy cercanos entre los picos.

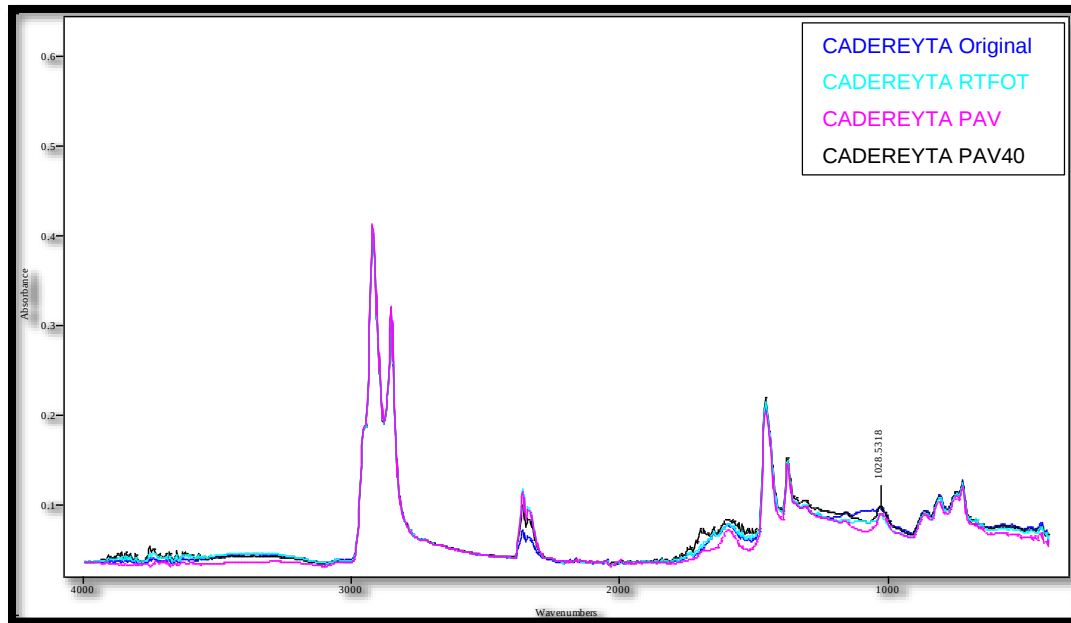


Figura 56. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.1.3. Asfalto Proveniente de Salamanca

En la Figura 57, se muestran los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Salamanca en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa en la banda de los sulfóxidos que el pico del asfalto va aumentando conforme va presentando mayor envejecimiento, siendo desde el asfalto original hasta el envejecido por PAV a 40 horas. Por otro lado, los espectros tienen una separación similar entre cada etapa de envejecimiento.

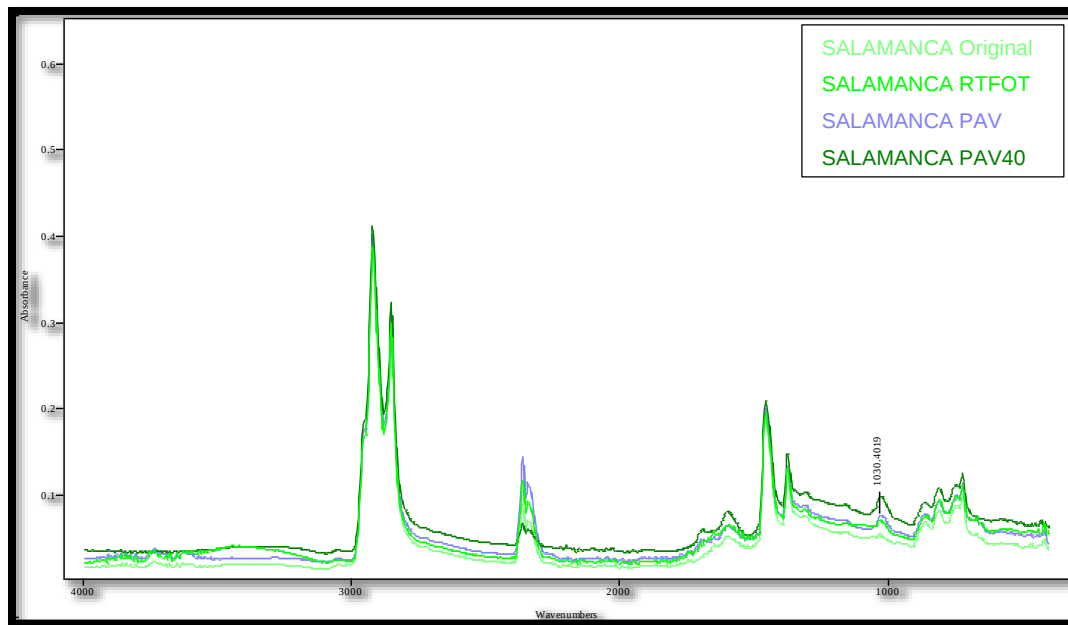


Figura 57. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.1.4. Asfalto Proveniente de Salina Cruz

En la Figura 58, se muestran los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Salina Cruz en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa que en la banda de los sulfóxidos va aumentando el pico conforme presenta un mayor envejecimiento. Además, los asfaltos que presentan el mayor envejecimiento de PAV y PAV a 40 horas se encuentran muy cercanos en el pico del espectro. Sin embargo, a pesar de que tiene una manera similar de comportarse con respecto al asfalto proveniente de la refinería de Salamanca, existe una diferencia entre el crecimiento que presenta cada uno de ellos.

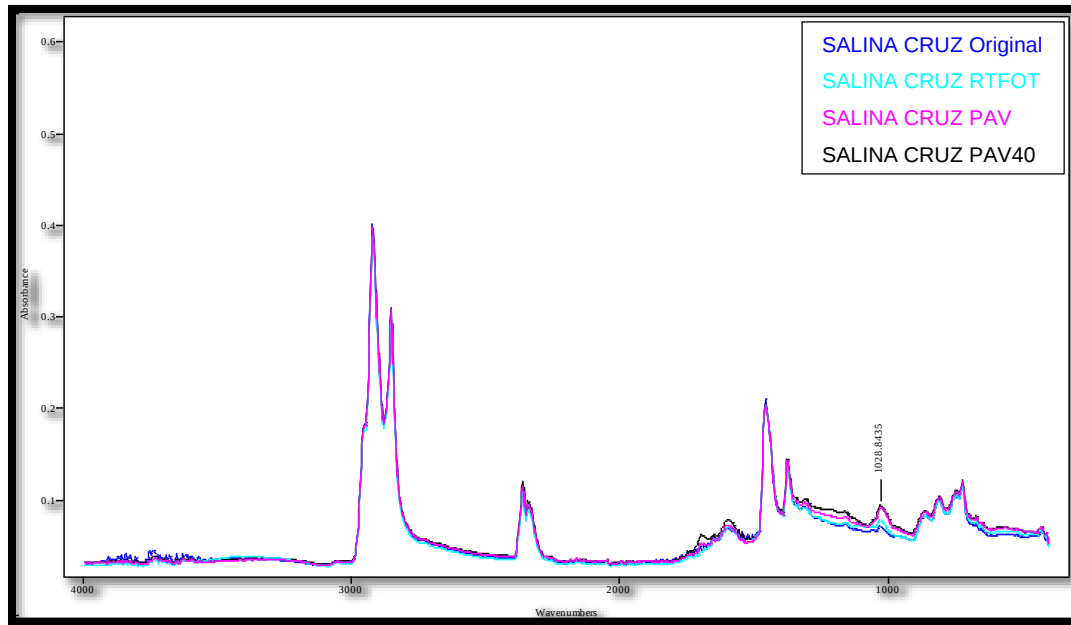


Figura 58. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.1.5. Asfalto Proveniente de Tula

En la Figura 59, se muestran los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Tula en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa en la banda de interés de los sulfóxidos que aumenta el pico conforme se va teniendo mayor envejecimiento. Además, los espectros de los asfaltos sometidos al RTFOT, PAV y PAV a 40 horas se encuentran muy cerca entre ellos, teniendo valores muy similares.

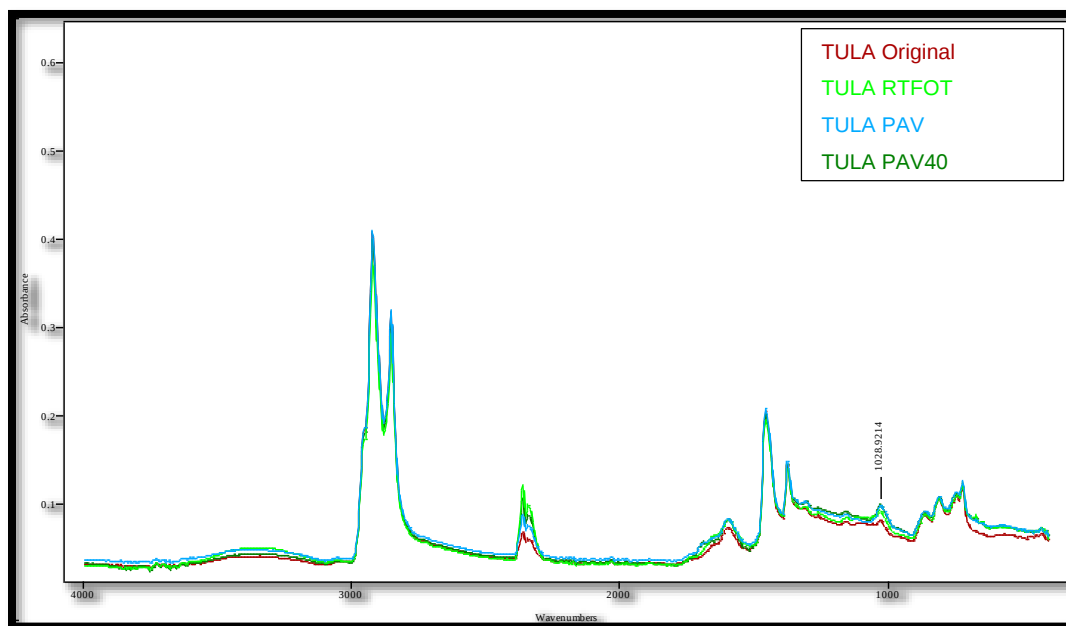


Figura 59. Espectro del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.1.6. Asfaltos Provenientes de las Refinerías en Estudio

En la Figura 60, se muestran los espectros de los asfaltos originales provenientes de las distintas refinerías. Se observa que el asfalto proveniente de la refinería de Salamanca presenta el pico más bajo, seguido del asfalto de la refinería de Salina Cruz y después del de Tula, sin embargo, los asfaltos de las refinerías de Altamira y Cadereyta presentan los picos más altos, estando muy cercanos sus espectros.

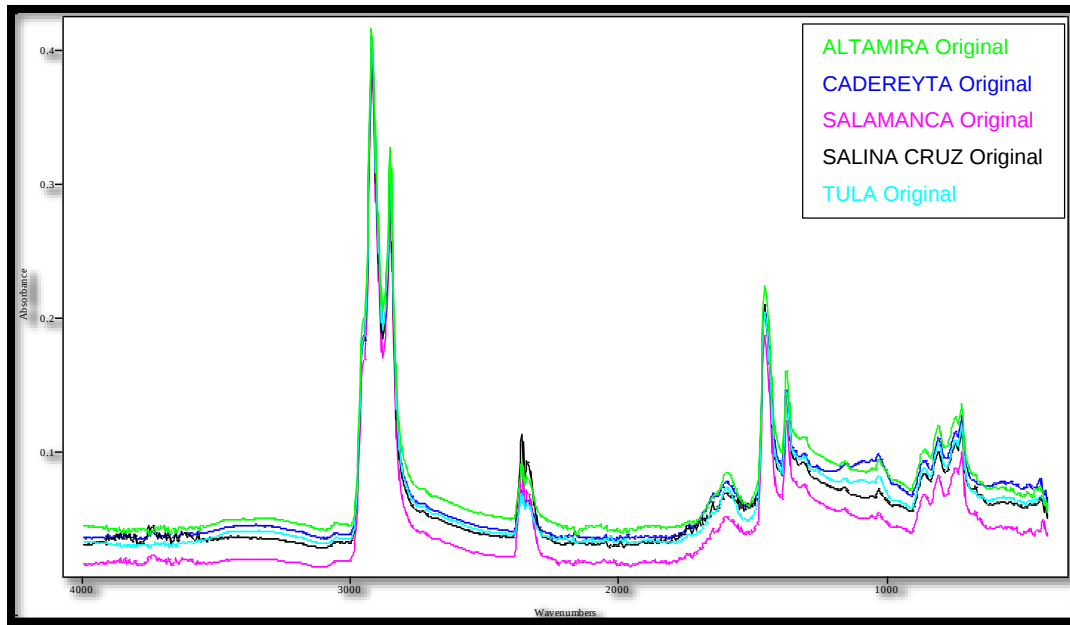


Figura 60. Espectros del Asfalto Original para los Asfaltos en Estudio.

3.3.1.7. Asfaltos Después del RTFOT Provenientes de las Refinerías en Estudio

En la Figura 61, se muestran los espectros de los asfaltos después de ser sometidos al RTFOT de las refinerías en estudio. Se observa que el pico del espectro del asfalto proveniente de la refinería de Salamanca es el más bajo, seguido del asfalto de la refinería de Salina Cruz y por arriba de ellos el asfalto de Cadereyta, y muy cercano a éste el asfalto proveniente de la refinería de Tula. Por último, el asfalto proveniente de la refinería de Altamira presenta el pico más alto respecto a los asfaltos descritos.

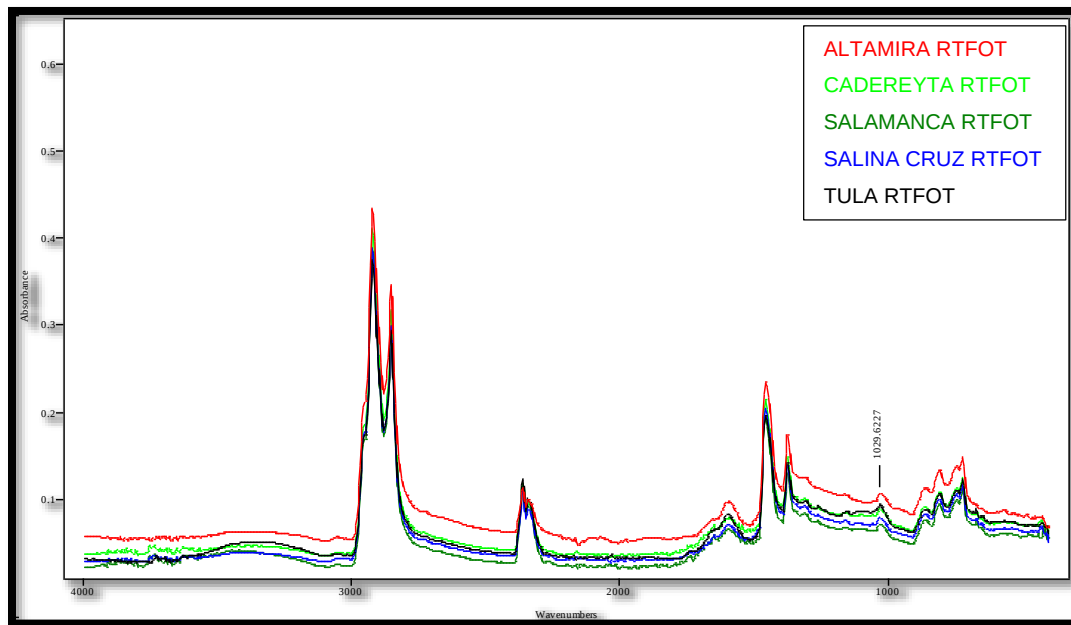


Figura 61. Espectros del Asfalto Envejecido por el RTFOT para los Asfaltos en Estudio.

3.3.1.8. Asfaltos Después de PAV Provenientes de las Refinerías en Estudio

En la Figura 62, se muestran los espectros de los asfaltos después de ser sometidos a PAV de las refinerías en estudio. Se observa que nuevamente el asfalto de Salamanca presenta el pico con menos elevación, y por arriba se encuentran los asfaltos de Cadereyta y Salina Cruz estando casi en la misma posición, seguido del asfalto de Tula y por último el asfalto que presenta el pico más elevado es el de la refinería de Altamira.

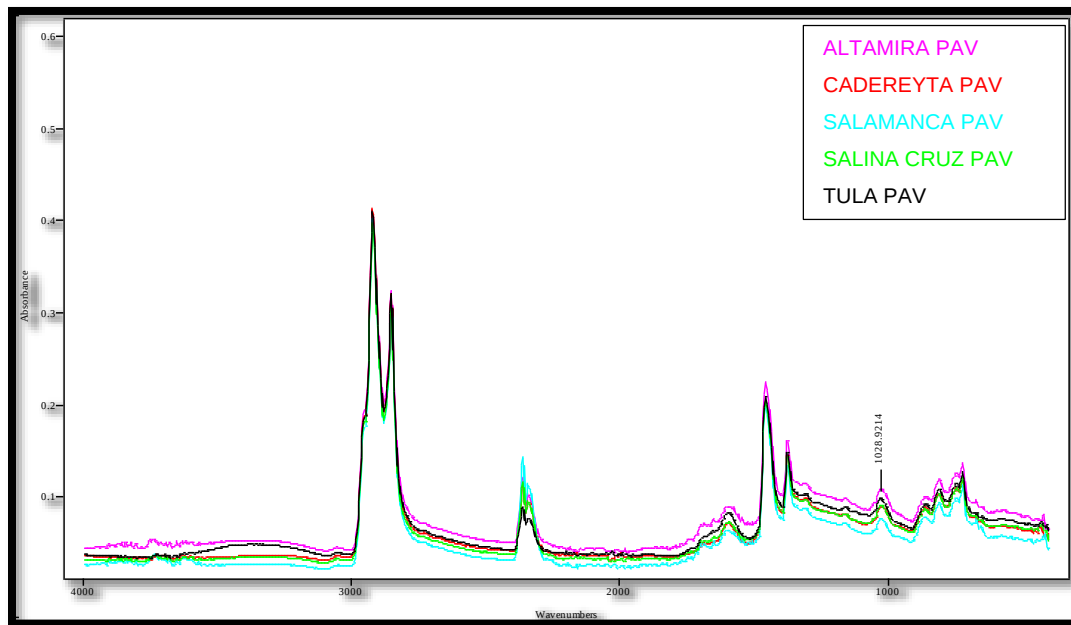


Figura 62. Espectros del Asfalto Envejecido por PAV para los Asfaltos en Estudio.

3.3.1.9. Asfaltos Después de PAV 40 horas Provenientes de las Refinerías en Estudio

En la Figura 63, se muestran los espectros de los asfaltos después de ser sometidos a PAV a 40 horas de los asfaltos en estudio. Se observa que el asfalto con el pico menor es el proveniente de la refinería de Salina Cruz, por encima de éste se encuentran los picos de los espectros de los asfaltos de Cadereyta, Salamanca y Tula muy juntos, tanto que se puede decir que están en la misma posición, y por último se encuentra el asfalto proveniente de la refinería de Altamira el cual presenta el pico más alto con respecto a los asfaltos descritos anteriormente.

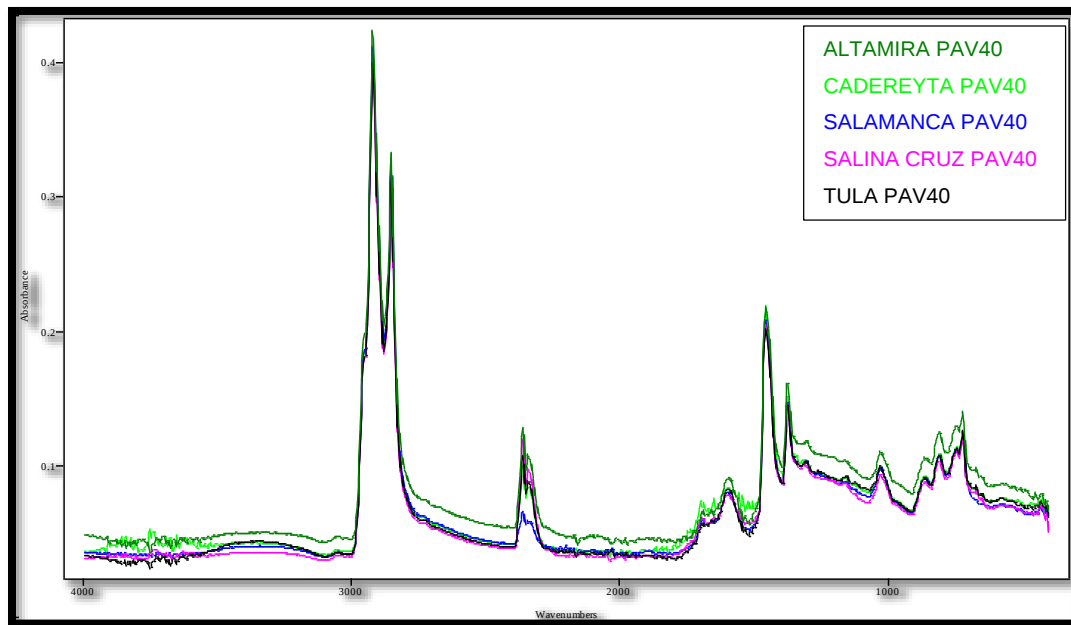


Figura 63. Espectros del Asfalto Envejecido por PAV a 40 horas para los Asfaltos en Estudio.

3.3.2. Áreas y Picos de los Espectros

3.3.2.1. Asfalto Proveniente de Altamira

En la Figura 64, se muestran los resultados de los picos y áreas de los asfaltos en estudio. Se observa que la altura de los picos va aumentando conforme se presenta un mayor envejecimiento, presenta una tasa de envejecimiento rápida al principio del envejecimiento y en las últimas dos etapas una tasa creciente más lenta, sin embargo, en el caso de las áreas obtenidas presenta una tasa de crecimiento rápida del asfalto original hasta el envejecido por el RTFOT. Además, comparando el asfalto sometido a envejecimiento a largo plazo por PAV con el envejecido a 40 horas presenta una tasa lenta en decremento. Esto es debido a factores influyentes, tales como el disolvente que se aplica para remover el asfalto y las condiciones atmosféricas en el laboratorio.

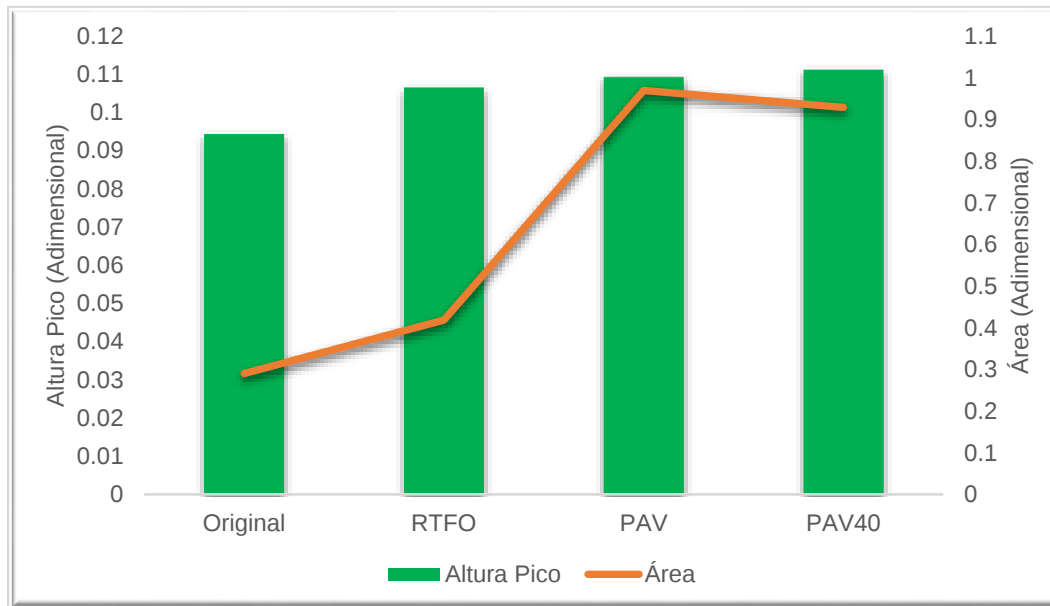


Figura 64. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.2.2. Asfalto Proveniente de Cadereyta

En la Figura 65, se muestran los resultados de los picos y áreas correspondientes al asfalto proveniente de la refinería de Cadereyta en sus distintas etapas. Para el pico del asfalto original se encuentra por arriba de los demás picos, esto es, debido a que cuando se realizaron las mediciones del espectro el solvente con el que se limpia el diamante aún no se había volatilizado por completo y a las condiciones en el ambiente. Sin embargo, el asfalto que se ha envejecido por el RTFOT, PAV y PAV a 40 horas muestra un aumento del pico conforme avanza el envejecimiento, y presenta una tasa de envejecimiento lenta en estas etapas. Por otra parte, respecto a las áreas obtenidas del asfalto original y envejecido por el RTFOT tiene una tasa de aumento muy lenta, aunque debería de comportarse de una forma rápida, esto es, debido a la misma razón descrita anteriormente, y comparando el asfalto envejecido por PAV y PAV a 40 horas presenta, de la misma manera, una tasa lenta.

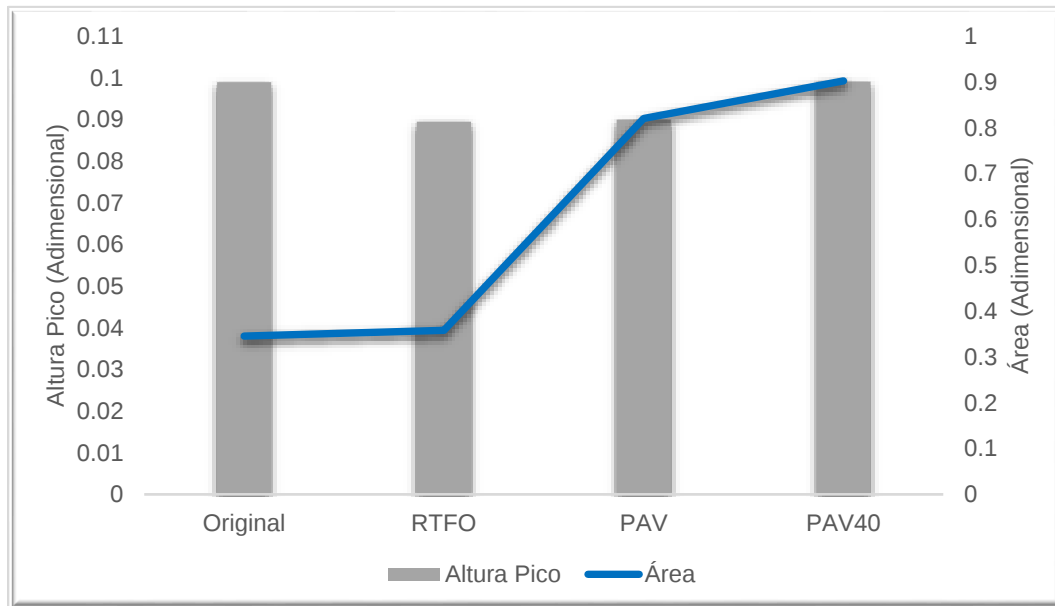


Figura 65. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.2.3. Asfalto Proveniente de Salamanca

En la Figura 66, se muestra los resultados de los picos y áreas de los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Salamanca. Se observa que las alturas de los picos presentan un crecimiento en la medida que va avanzando el envejecimiento. Para el caso de las áreas en el asfalto original y el envejecido por el RTFOT presenta una tasa rápida, sin embargo, el asfalto envejecido por PAV y PAV a 40 horas continua presentando una tasa creciente rápida.

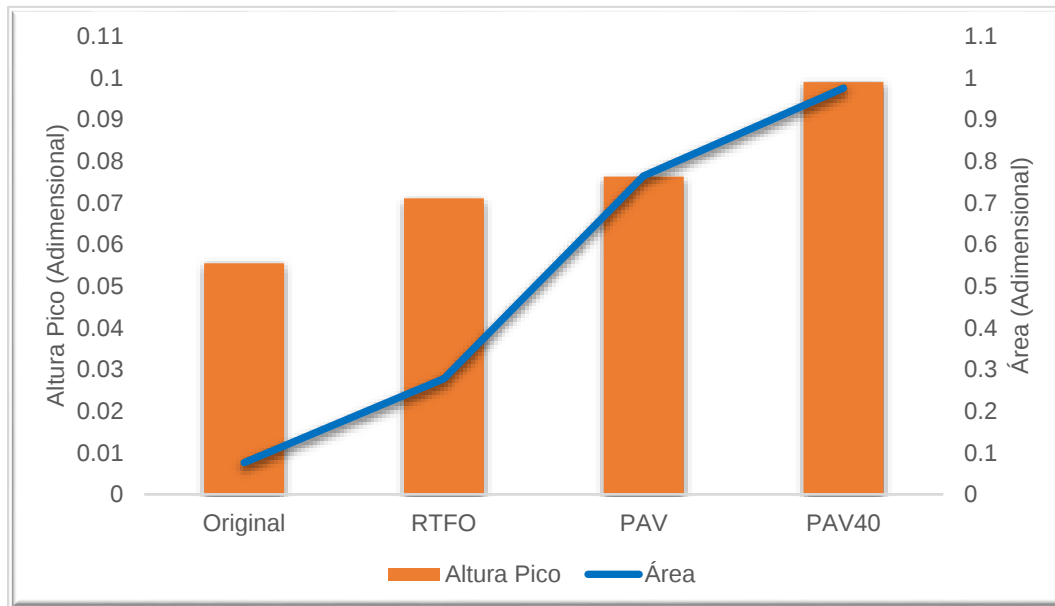


Figura 66. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.2.4. Asfalto Proveniente de Salina Cruz

En la Figura 67, se muestran los resultados de los picos y áreas de los espectros correspondientes al asfalto proveniente de Salina Cruz en sus distintas etapas. Para la parte de los picos se observa que va aumentando la altura conforme avanza el envejecimiento, con una tasa rápida en el asfalto original y envejecido por el RTFOT, y con respecto al asfalto envejecido por PAV y PAV a 40 horas cambia a una tasa de crecimiento lenta. Por otro lado, el área correspondiente al asfalto original y envejecido por el RTFOT presenta una tasa de envejecimiento rápida, y con respecto al área del asfalto envejecido por PAV y PAV a 40 horas se observa una tasa de crecimiento lenta.

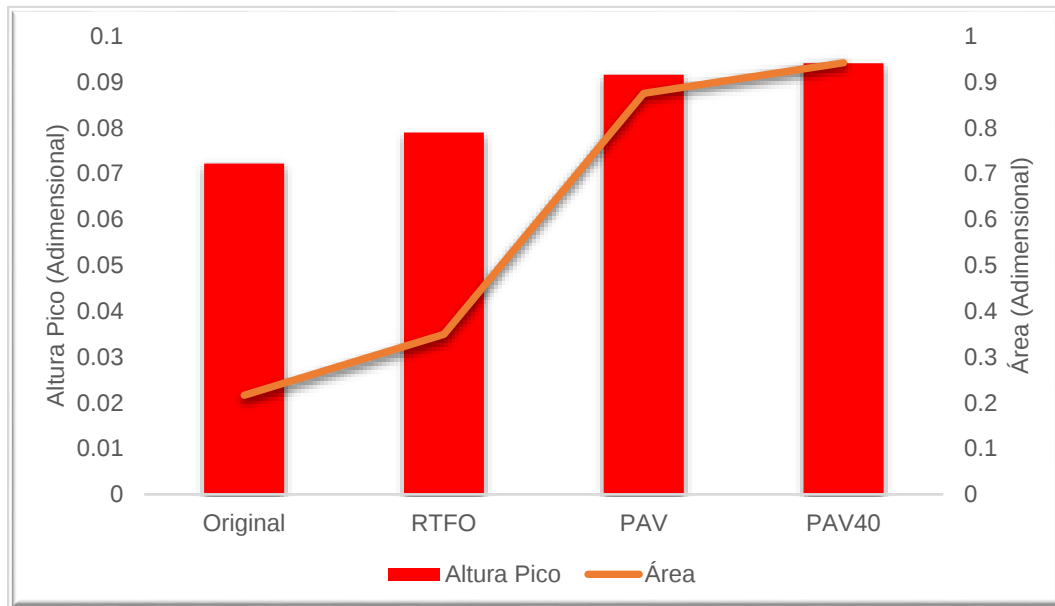


Figura 67. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.2.5. Asfalto Proveniente de Tula

En la Figura 68, se muestra los resultados de los picos y áreas de los espectros del asfalto proveniente de la refinería de Tula en sus distintas etapas. Para el caso de los picos, se observa que tiene un aumento de altura como va avanzando el envejecimiento, así mismo, del asfalto original y envejecido por el RTFOT presenta una tasa rápida de envejecimiento, y con respecto al asfalto ensayado por PAV y PAV a 40 horas se observa una tasa lenta de envejecimiento. Sin embargo, en el caso de las áreas se observa una tasa rápida creciente de envejecimiento con respecto al asfalto original y envejecido por el RTFOT, y el asfalto con envejecimiento a largo plazo por PAV y PAV a 40 horas presenta una tasa lenta ascendente.

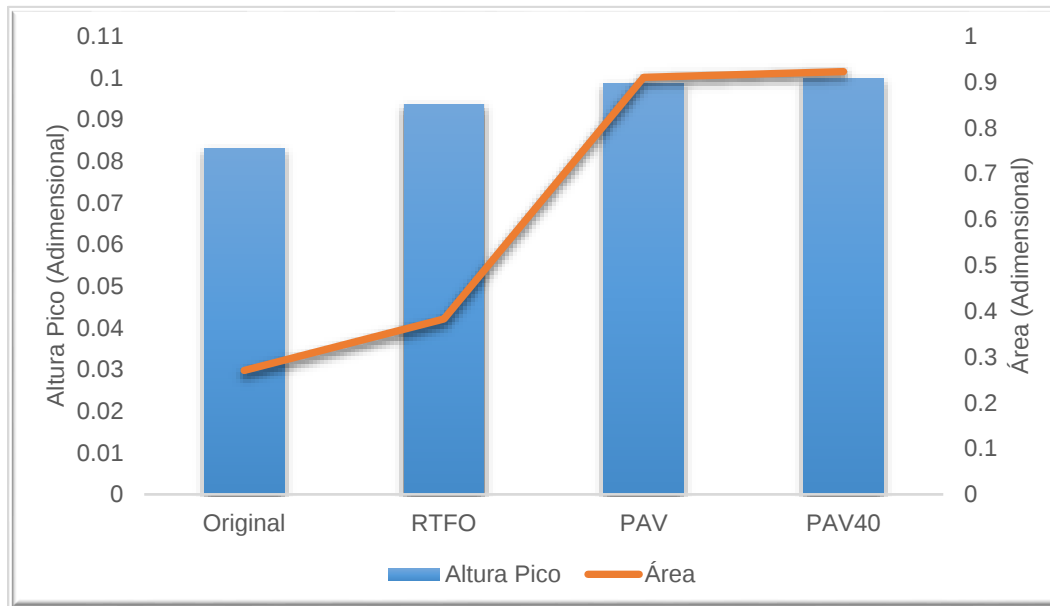


Figura 68. Resultados de los Picos y Áreas del Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula en sus distintos estados de envejecimiento.

3.3.2.6. Áreas de los Asfaltos en Estudio

En la Figura 69, se muestran las áreas de los espectros provenientes de las refinerías de Tula, Salamanca, Cadereyta, Salina Cruz y Altamira en sus distintas etapas de envejecimiento. Se observa que en los asfaltos antes de ser sometidos a algún envejecimiento, el área es distinta en todos los asfaltos en estudio, cuando son sometidos a envejecimiento por el RTFOT, los únicos asfaltos que tienen una área similar son los asfaltos provenientes de la refinería de Cadereyta y Salina Cruz, y los otros asfaltos presentan áreas diferentes. Después se encuentran los asfaltos envejecidos mediante PAV, en el cual, los asfaltos en estudio presentan áreas muy distintas, y por último se observan los asfaltos envejecidos por PAV a 40 horas, en donde los asfaltos provenientes de la refinería de Tula, Salina Cruz y Altamira presentan un área similar, estando juntas en este punto.

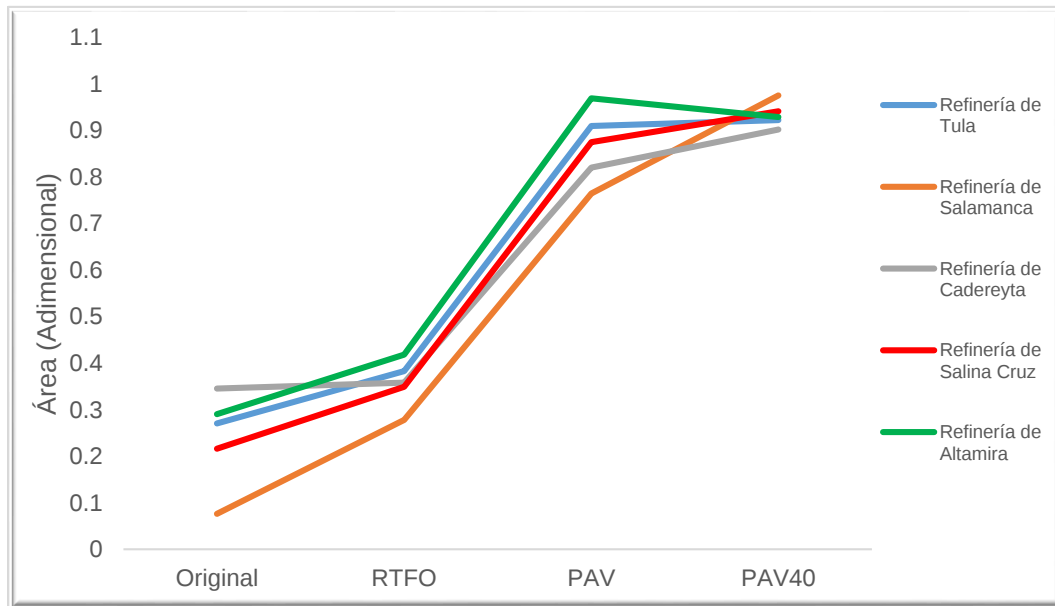


Figura 69. Resultados del Área de los Asfaltos en Estudio en sus distintas etapas de envejecimiento.

Sin embargo, se observa en la Figura 69, en términos generales, que los asfaltos presentan áreas muy distintas entre ellos en todas sus etapas. Por otra parte, se aprecia que los distintos asfaltos tienen una pendiente ascendente similar en la etapa de envejecimiento por el RTFOT a PAV. Además, en el caso de los asfaltos antes de ser sometidos a un envejecimiento hasta el envejecido por el RTFOT, los asfaltos provenientes de la refinería de Altamira, Tula, Salina Cruz y Salamanca presentan una tasa rápida de envejecimiento, mientras que el asfalto de Cadereyta tiene una tasa lenta de crecimiento. Por último, en las etapas envejecidas por PAV y PAV a 40 horas los asfaltos provenientes de las refinerías de Tula, Cadereyta y Salina Cruz tienen una tasa lenta de envejecimiento, mientras que el asfalto de la refinería de Salamanca presenta una tasa rápida de envejecimiento y en el asfalto proveniente de la refinería de Altamira se aprecia una tasa lenta en decremento, esto debido a lo descrito en un análisis previo.

3.4. Análisis de Resultados

3.4.1. Propiedades Físicas

Para el análisis de resultados se identificarán los asfaltos únicamente por el nombre de la refinería en la cual fue realizada su refinación, esto para ser más breves y precisos cuando se haga referencia a algún asfalto, como por ejemplo se escribirá “Asfalto de Altamira”.

Se supone que la clasificación por grado de desempeño de los asfaltos en estudio había sido en todos los casos con un grado de desempeño PG 64-22. Sin embargo, en el desarrollo de la presente investigación se encontró que en algunos casos la clasificación correspondía a un PG 64-16, por lo tanto, la clasificación que se encuentra en la Normativa Mexicana N-CMT-4-05-004/08 no contiene el grado de desempeño en temperatura baja hasta los -16°C , debido a esto, fue utilizada la Norma ASTM D6373, permitiendo con esto un estudio más amplio entre las temperaturas que correspondan.

3.4.1.1. Penetración

Las penetraciones obtenidas en los ensayos se pueden utilizar para tener una idea del comportamiento que puede tener el asfalto, para ello se utilizará como un parámetro de referencia la clasificación por viscosidad con base en la Norma N-CMT-4-05-001/06. Esto es, con el fin de evaluar los asfaltos con los valores especificados en la Norma y también para demostrar que si se utilizan estos sistemas de clasificación resultan asfaltos de diferente tipo. Entonces, los asfaltos en estudio, utilizando la clasificación por viscosidad principalmente se encuentran en una penetración aproximada al valor de 80 correspondiente a un asfalto AC-10. Además, los asfaltos se mencionarán del más rígido al más blando, como son: Altamira, Salamanca, Tula, Salina Cruz y Cadereyta.

3.4.1.2. Punto de Reblandecimiento

El punto de reblandecimiento de cada asfalto resultó distinto, y nuevamente se utilizará como apoyo la clasificación por viscosidad con base en la Norma N-CMT-4-05-001/06, utilizándola como parámetro de referencia, con el objetivo de evaluar el comportamiento del asfalto a través de los valores especificados en la Norma, sin embargo, para éste estudio no fue considerado éste método de clasificación. Los asfaltos de Cadereyta, Salina Cruz, Tula y Altamira se encuentran en un rango de 48-56 correspondiente a un AC-20, y el asfalto de Salamanca en un rango de 50-58 correspondiente a un AC-30, los cuales no nos dan una clasificación parecida a la analizada en la penetración. Por otro lado, los asfaltos se mencionarán del que presenta un grado mayor de fluencia al menor, como son: Salamanca, Altamira, Tula, Salina Cruz y Cadereyta.

3.4.1.3. Viscosidad Rotacional en el Asfalto Original

Las viscosidades rotacionales aplicadas en el asfalto original obtenidas en los ensayos se pueden verificar con el parámetro de grado de desempeño con base en la Norma ASTM D6373. Esto es, que presente una viscosidad rotacional $3 \geq$ en Pa·s a los 135°C, en todos los asfaltos en estudio se cumple con dicha temperatura. Los asfaltos se mencionarán desde los más viscosos hasta los que presentan menor viscosidad, como son: Altamira, Salamanca, Tula, Cadereyta y Salina Cruz.

3.4.1.4. Viscosidad Rotacional Después del RTFOT

Las viscosidades rotacionales obtenidas después de haber sido sometidas al RTFOT son muy diferentes y variables a las originales, y por ello una diferencia notoria entre el comportamiento de las viscosidades, se mencionarán los asfaltos desde el que resultó ser más viscoso hasta el menos viscoso, como son: Altamira, Salina Cruz, Salamanca, Tula y Cadereyta.

3.4.1.5. Cambio de Masa

La pérdida de masa debe de ser menor que 1% con base en la clasificación por grado de desempeño con base en la Norma ASTM D6373. Los asfaltos de Salina Cruz, Tula, Cadereyta y Salamanca tuvieron valores menores que éste límite. Por otra parte, el asfalto de Altamira presentó un valor por encima de 1%, esto se debe a que cuando el asfalto es sometido a calentamiento, algunas partículas se volatilizan y se pierde cierta cantidad de la masa.

3.4.2. Resultados Reológicos

Los resultados reológicos obtenidos para la clasificación por grado de desempeño con base en la Norma ASTM D6373, se determinó que los asfaltos en estudio cumplieron con los parámetros $G^*/\sin\delta$ cuando el asfalto es sometido al RTFOT y el parámetro de $G^*\sin\delta$ cuando el asfalto es sometido al PAV. El grado de desempeño de los asfaltos de Salamanca, Salina Cruz y Tula fue un PG 64-16, para el asfalto de Cadereyta un PG 64-22 y por último el asfalto de Altamira presentó un PG 70-22.

Las curvas maestras tienen un comportamiento adecuado debido a que el modelo se ajusta al módulo de corte de manera adecuada en todos los asfaltos obteniendo errores iguales a 0 y correlaciones mayores de 0.97. Para el caso del asfalto en estado original presentaron un comportamiento similar entre los asfaltos en estudio. Después de ser sometidos al RTFOT los asfaltos tuvieron un comportamiento similar entre ellos, a excepción del asfalto de Salina Cruz. Por último, cuando los asfaltos fueron sometidos al PAV presentaron una diferencia notoria entre todos los asfaltos, esto debido a los cambios que provoca el envejecimiento a largo plazo en el asfalto.

3.4.3. Espectros de Infrarrojo FTIR

En los espectros obtenidos por infrarrojo mediante la Transformada de Fourier en la banda del grupo funcional de los sulfóxidos, las mediciones realizadas mediante el Método de los Picos y Áreas presentan una tendencia distinta en las diferentes etapas, se mencionarán los asfaltos desde el valor más alto hasta el más bajo de picos y áreas, como son: Altamira, Tula, Salina Cruz, Cadereyta y Salamanca.

El asfalto con mayor tasa de envejecimiento es el de Salamanca, seguido por el asfalto de Cadereyta con una tasa menor de envejecimiento, después los asfaltos de Tula y Salina Cruz con una tasa de envejecimiento menor entre sus distintas etapas, y por último el asfalto de Altamira con la tasa de envejecimiento más baja.

Conclusiones

Las propiedades físicas evaluadas en los asfaltos en estudio fueron de gran utilidad para conocer el comportamiento que presenta cada uno de ellos. En el estudio realizado en laboratorio se obtuvieron resultados distintos en cada una de las pruebas de los diferentes asfaltos en estudio, a pesar de que teóricamente están clasificados con el mismo grado de desempeño y son extraídos del mismo crudo de petróleo.

Las características reológicas de los asfaltos son importantes para determinar el grado de desempeño en el que se desarrolla cada uno de los asfaltos, además de cumplir con parámetros que determinan un buen comportamiento del asfalto. De los cinco asfaltos que se utilizaron para este estudio, tres tuvieron un comportamiento similar (Salamanca, Tula y Salina Cruz), y los otros dos distintos entre ellos (Cadereyta y Altamira). Con este estudio se determinó que los asfaltos provenientes de la refinería de Salamanca, Tula y Salina Cruz pertenecen a un grado de desempeño PG 64-16, el asfalto proveniente de la refinería de Cadereyta a un grado de desempeño PG 64-22 y el asfalto proveniente de la refinería de Altamira a un grado de desempeño PG 70-22.

El envejecimiento a corto y largo plazo en los asfaltos es necesario para poder realizar una caracterización detallada y completa. Esto es solo una simulación de la pérdida de propiedades que presenta el asfalto en un período. Todos los asfaltos que fueron utilizados en el estudio se sometieron a estos ensayos para posteriormente analizar sus características.

Las características de envejecimiento de los asfaltos en estudio obtenidas mediante espectrometría infrarroja por Transformada de Fourier, fueron determinadas con los espectros en la banda de los sulfóxidos mediante los picos y áreas de cada asfalto en los distintos estados. El comportamiento de los asfaltos resultó ser muy distinto en cada una de las etapas de envejecimiento, y entre todos los asfaltos en estudio. Por otra parte, el asfalto proveniente de la refinería de Salamanca presentó una tasa

rápida de envejecimiento en toda su trayectoria, el de Cadereyta una tasa lenta y luego una tasa rápida de envejecimiento, y en cambio los asfaltos provenientes de la refinería de Tula, Salina Cruz y Altamira indicaron tener una tasa rápida y después continuar con una tasa lenta de envejecimiento en las distintos estados.

Los barridos de frecuencia se aplicaron a todos los asfaltos en estudio para realizar el análisis de su comportamiento mediante el modelo MHN, generando las curvas maestras en un rango amplio de frecuencias y temperaturas. Los asfaltos se comportaron de forma similar en la etapa original, después de ser envejecidos por el RTFOT se presentó una dispersión entre ellos no muy importante, y después de ser sometidos al PAV hubo una dispersión importante entre todos los asfaltos, generando un comportamiento distinto en el envejecimiento a largo plazo.

Los cinco asfaltos utilizados para el estudio fueron provenientes de las refinerías de Salamanca, Tula, Cadereyta, Salina Cruz y Altamira, los cuales son extraídos del mismo crudo de petróleo en el territorio mexicano y siendo refinado en cada una de las instalaciones mencionadas, y aunque se supone que son de la misma fuente de crudo, presentan características muy distintas entre ellos. Además, cuando son sometidos a envejecimientos a corto y largo plazo, y se realiza el análisis de sus propiedades en cada uno de los estados, sus características presentan variaciones importantes. Una de las causas de la variación en el comportamiento de los asfaltos puede ser el proceso de refinación que se lleva a cabo en cada refinería.

Bibliografía

1. *Ingenieria-Arquitectura-Hogar*. [En línea] 2015. [Citado el: 03 de Marzo de 2017.] <http://www.rentauningeniero.com/antecedentes-de-los-pavimentos-en-mexico.html>.
2. SCT. *Infraestructura*. [En línea] SCT, 2006. [Citado el: 16 de Febrero de 2017.] <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/67636/CAP-04.pdf>.
3. Prapaitrakul, Nikornpon. *Toward an Improved Model of Asphalt Binder Oxidation in Pavements*. Texas : s.n., 2009.
4. Morian, Nathaniel E. *Influence of Mixture Characteristics on the Oxidative Aging of Asphalt Binders*. Nevada, Reno : s.n., 2014.
5. SCT. Calidad de Materiales Asfálticos. CMT. *Características de los materiales*. Mexico D.F. : Instituto Mexicano del Transporte, 2006, págs. 1-13.
6. Méndez, Juliana Puello. *Evolución del comportamiento viscoelástico lineal de fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento acelerado*. Bucaramanga : s.n., 2012.
7. Speight, J. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. 4th Ed. New York : Taylor and Francis Group, 2007.
8. Martina, Garcia Eiler Luciana. *Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield*. s.l. : LEMaC, 2009.
9. Delgado, Quim. Jorge Salazar. *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano(RTCA 75.01.22:047)*. s.l., Costa Rica : LanammeUCR, 2011. Vol. 1.
10. *Binder characterization and evaluation, volume 3: physical characterization*. Anderson, D. A., et al. Washington DC. : Strategic Highway Research Program (SHRP) Rep. No. A-369, National Research Council, 1994.

11. *Time-temperature dependency of asphalt binders—an improved model.* Marateanu M, Anderson D. s.l. : Journal Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 65.
12. *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders.* Yusoff NIM, Shaw MT, Airey GD. s.l. : Const Build Mater, 2011, Vol. 25.
13. *Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures.* Zeng M, Bahia H, Zhai H, Turner P. s.l. : J Assoc Asphalt Paving Technol, 2001, Vol. 70.
14. *Dynamic Mechanical Testing of Bitumen: Sample Preparation Methods.* Airey, G.D. and Hunter, E. TR 2, s.l. : Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, 2003, Vol. 156.
15. *Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens.* Gordon, Aire. s.l. : University of Nottingham, 1997.
16. *Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using a complex modulus model.* Zhao, Y., Liu, H., Bai, L., and Tan, Y. s.l. : J. Mater. Civ. Eng., 2013. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.
17. *A consistent approach for characterising asphalt concrete based on generalised Maxwell or Kelvin model.* Zhao, Y., Ni, Y., and Zeng, W. 3, s.l. : Road Mater. Pavement Des., 2014, Vol. 15.
18. *The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: An introduction.* Tschoegl, N. W. New York : Springer, 1989.
19. *Extension of Modified Havriliak-Negami Model to Characterize Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Binders.* Yanqing Zhao, Ph.D. Peisong Chen and Dandan Cao. s.l. : Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2015. ISSN 0899-1561.

20. Officials, American Association Of State Highway and Transportation. *AASHTOWare Pavement ME Design*. [ed.] American Association of State Highway. Washington D.C. : s.n., 2013.
21. Witzack, Muhammad W. Mirza and Matthew W. *Development of a Globl Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements*. Ann Arbor : s.n. Vol. 64.
22. Harnsberger, J. Claine Petersen and P. Michael. *Asphalt Aging, Dual Oxidation Mechanism and Its Interrelationships with Asphalt Composition and Oxidative Age Hardening*. [ed.] Transportation Research Record No. 1638. Washington D.C. : Journal of the Transportation Research Board, 1998.
23. Glaser, J. Claine Petersen and Ronald. *Asphalt Oxdiaion Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited*. [ed.] Taylor & Francis. London : s.n., 2011. Vol. 12.
24. R.C. Reid, J.M. Prausnitz and T.K. Sherwood. *The Properties of Gases and Liquids*. 4th Edition. New York, NY : McGraw-Hill, 1984.
25. Lunsford, Kevin M. *The Effect of Temperature and Pressure on Laboratory Oxidized Asphalt Films with Comparision to Field Aging*. [ed.] Department of Chemical Engineering. College Station. Texas A&M University : Ph. D. Dissertation, 1994.
26. Han, Rongbin. *Improvement to a Transport Model of Asphalt Binder Oxidation in Pavements: Pavement Temepature Modeling, Oxygen Diffusivity in Asphalt Binders and Mastics, and Pavement Aire Void Characterization*. [ed.] Chemical Engineering Deparment. College Station. Texas A&M University : Ph. D. Dissertation, 2011.
27. Mohammad Zia Alavi, Mohammad Reza Pouranian, and Elie Y. Hajj. *Prediction of Asphalt Pavement Temperature Profile Using the Finite Control Volume Method (FCVM)*. [ed.] Transportation Research Board of the National. Washington D.C. : In

Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, 2014.

28. Refinación, PEMEX. PEMEX Refinacion. *La Refinería de Salamanca*. [En línea] 2012. [Citado el: 05 de Marzo de 2017.] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/20sala.htm>.

29. —. PEMEX Refinación. *La Refinería Miguel Hidalgo*. [En línea] 2012. [Citado el: 05 de Marzo de 2017.] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/17miguel.htm>.

30. —. PEMEX Refinación. *El Proyecto Cadereyta 2000*. [En línea] 2012. [Citado el: 05 de Marzo de 2017.] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/19cadr.htm>.

31. —. PEMEX Refinación. *La Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime*. [En línea] 2012. [Citado el: Marzo de 05 de 2017.] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/22salina.htm>.

32. —. PEMEX Refinación. *Refinería Francisco I. Madero*. [En línea] 2012. [Citado el: 05 de Marzo de 2017.] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/21ref.htm>.

33. Asphalt Institute. *Asphalt Binder Testing: Technician's Manual for Specification Testing of Asphalt Binders*. Third Edition. 2012. Manual Series No. 25.

34. Ferry, J. D. *Viscoelastic properties of polymers, 3rd Ed*. New York : Willey, 1980.

35. *Rheology of Bituminous Binders Glossary of Rheological Terms: A Practical Summary of the Most Common Concepts*. Eurobitume. s.l. : European Bitumen Association, 1996.

Anexos

Anexo A. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio antes de ser sometidos a algún envejecimiento.

Nota: Los datos experimentales de barridos de frecuencia presentados en los anexos son los que se utilizaron para hacer el ajuste de las curvas maestras. Para el caso de módulo de corte y ángulo de fase se eliminaron algunos valores debido a las limitaciones del equipo, ya que algunos datos no presentaron un comportamiento adecuado, y se colocó un guion en estos casos.

Tabla 17. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Tula.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	523100	62.42
10	0.02531	0.1585	629200	-
10	0.03995	0.2512	984500	-
10	0.06334	0.3981	-	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	195200	69.76
16	0.02531	0.1585	259400	67.36
16	0.03995	0.2512	366100	60.53
16	0.06334	0.3981	515200	-
16	0.1004	0.631	752500	-
16	0.1592	1	922400	-
16	0.2532	1.585	1366000	-
16	0.4	2.512	2041000	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	63740	68
22	0.02531	0.1585	89960	67.08
22	0.03995	0.2512	125400	65.79

Tabla 18. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Salamanca.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	396500	63.235
10	0.02531	0.1585	520550	60.275
10	0.03995	0.2512	695100	55.025
10	0.06334	0.3981	895300	-
10	0.1004	0.631	1288500	-
10	0.1592	1	1620000	-
10	0.2532	1.585	2310500	-
10	0.4	2.512	2283000	-
10	0.6342	3.981	2647000	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	164100	63.98
16	0.02531	0.1585	225650	62.815
16	0.03995	0.2512	283400	-
16	0.06334	0.3981	353100	-
16	0.1004	0.631	478100	-
16	0.1592	1	641100	-
16	0.2532	1.585	818100	-
16	0.4	2.512	1054000	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	60010	68.76
22	0.02531	0.1585	82440	66.785
22	0.03995	0.2512	114650	64.86

22	0.06334	0.3981	168500	64.27	22	0.06334	0.3981	160450	-
22	0.1004	0.631	233400	59.73	22	0.1004	0.631	214900	-
22	0.1592	1	301000	-	22	0.1592	1	299900	-
22	0.2532	1.585	450400	-	22	0.2532	1.585	399550	-
22	0.4	2.512	673800	-	22	0.4	2.512	563000	-
22	0.6342	3.981	994600	-	22	0.6342	3.981	749850	-
22	1.007	6.31	1451000	-	22	1.007	6.31	791200	-
22	1.596	10	-	-	22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-	22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-	22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-	22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-	22	10.35	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-	22	16.67	100	-	-
28	0.01592	0.1	18640	72.88	28	0.01592	0.1	19390	73.205
28	0.02531	0.1585	26840	71.65	28	0.02531	0.1585	26850	71.225
28	0.03995	0.2512	38800	70.1	28	0.03995	0.2512	38380	70.265
28	0.06334	0.3981	54870	68.79	28	0.06334	0.3981	54120	68.69
28	0.1004	0.631	76920	66.73	28	0.1004	0.631	76325	67.89
28	0.1592	1	108500	66.08	28	0.1592	1	108095	-
28	0.2532	1.585	153000	-	28	0.2532	1.585	154250	-
28	0.4	2.512	210400	-	28	0.4	2.512	199250	-
28	0.6342	3.981	306200	-	28	0.6342	3.981	296800	-
28	1.007	6.31	416800	-	28	1.007	6.31	410700	-
28	1.596	10	530300	-	28	1.596	10	552750	-
28	2.542	15.85	-	-	28	2.542	15.85	-	-
28	4	25.12	-	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.35	63.1	-	-	28	10.35	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-
34	0.01592	0.1	5508	77.9	34	0.01592	0.1	5528	78.19
34	0.02531	0.1585	8292	75.77	34	0.02531	0.1585	8221	75.535
34	0.03995	0.2512	12050	74.4	34	0.03995	0.2512	11950	74.165
34	0.06334	0.3981	17330	73.17	34	0.06334	0.3981	17240	73.09
34	0.1004	0.631	24860	72.01	34	0.1004	0.631	24850	72.11
34	0.1592	1	36250	71.38	34	0.1592	1	35740	70.795
34	0.2532	1.585	51650	69.86	34	0.2532	1.585	51235	69.44
34	0.4	2.512	74310	69.4	34	0.4	2.512	72595	68.49
34	0.6342	3.981	103200	68.33	34	0.6342	3.981	105615	68.24
34	1.007	6.31	153200	66.08	34	1.007	6.31	150950	65.695
34	1.596	10	207800	-	34	1.596	10	208800	-
34	2.542	15.85	305400	-	34	2.542	15.85	295100	-
34	4	25.12	406300	-	34	4	25.12	356200	-
34	6.383	39.81	566800	-	34	6.383	39.81	501700	-
34	10.35	63.1	-	-	34	10.35	63.1	690500	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	1645	81.98	40	0.01592	0.1	1715.5	81.81
40	0.02531	0.1585	2452	79.55	40	0.02531	0.1585	2552	79.35
40	0.03995	0.2512	3661	78.67	40	0.03995	0.2512	3795	78.36
40	0.06334	0.3981	5505	77.71	40	0.06334	0.3981	5604	77.17
40	0.1004	0.631	8132	76.16	40	0.1004	0.631	8369	76.16
40	0.1592	1	11870	75.19	40	0.1592	1	12315	74.79
40	0.2532	1.585	17550	74.02	40	0.2532	1.585	18100	73.94
40	0.4	2.512	25530	73.03	40	0.4	2.512	26260	72.9
40	0.6342	3.981	36850	71.73	40	0.6342	3.981	37775	71.54
40	1.007	6.31	52740	71.19	40	1.007	6.31	54440	70.35
40	1.596	10	74790	70.49	40	1.596	10	78465	69.44
40	2.542	15.85	107400	69.82	40	2.542	15.85	111300	68.505

40	4	25.12	155400	67.56	40	4	25.12	158550	-
40	6.383	39.81	212400	-	40	6.383	39.81	222500	-
40	10.35	63.1	-	-	40	10.35	63.1	297500	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	-	-
46	0.01592	0.1	541.9	82.41	46	0.01592	0.1	550.35	81.735
46	0.02531	0.1585	800.5	80.34	46	0.02531	0.1585	824.25	80.685
46	0.03995	0.2512	1195	79.97	46	0.03995	0.2512	1237.5	80.175
46	0.06334	0.3981	1821	79.72	46	0.06334	0.3981	1866	79.635
46	0.1004	0.631	2753	78.96	46	0.1004	0.631	2798	78.72
46	0.1592	1	4100	77.79	46	0.1592	1	4175	77.935
46	0.2532	1.585	6121	77.08	46	0.2532	1.585	6241.5	77.225
46	0.4	2.512	8993	76.14	46	0.4	2.512	9197	76.1
46	0.6342	3.981	13240	75.11	46	0.6342	3.981	13565	75.145
46	1.007	6.31	19420	73.97	46	1.007	6.31	19840	73.965
46	1.596	10	28510	72.82	46	1.596	10	29005	73.04
46	2.542	15.85	41100	72.18	46	2.542	15.85	42050	71.94
46	4	25.12	59360	71.5	46	4	25.12	60515	70.7
46	6.383	39.81	82920	68.48	46	6.383	39.81	83895	67.905
46	10.35	63.1	-	-	46	10.35	63.1	114700	-
46	16.67	100	-	-	46	16.67	100	-	-
52	0.01592	0.1	130.3	86.86	52	0.01592	0.1	146	85.195
52	0.02531	0.1585	202.6	85.2	52	0.02531	0.1585	224.35	84.06
52	0.03995	0.2512	315.6	-	52	0.03995	0.2512	344.3	83.73
52	0.06334	0.3981	489.7	-	52	0.06334	0.3981	538.75	83.2
52	0.1004	0.631	740.6	-	52	0.1004	0.631	812	-
52	0.1592	1	1140	-	52	0.1592	1	1205	-
52	0.2532	1.585	1671	-	52	0.2532	1.585	1902	-
52	0.4	2.512	2466	-	52	0.4	2.512	2668	-
52	0.6342	3.981	4047	-	52	0.6342	3.981	-	-
52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.34	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	53.87	87.93	58	0.01592	0.1	60.625	85.04
58	0.02531	0.1585	84.73	87.17	58	0.02531	0.1585	93.52	84.86
58	0.03995	0.2512	132	86.34	58	0.03995	0.2512	144.45	84.67
58	0.06334	0.3981	205	85.25	58	0.06334	0.3981	223.55	84.51
58	0.1004	0.631	318.9	-	58	0.1004	0.631	339.05	84.345
58	0.1592	1	474.4	-	58	0.1592	1	525.3	83.215
58	0.2532	1.585	755.2	-	58	0.2532	1.585	792.8	82.345
58	0.4	2.512	1135	-	58	0.4	2.512	1235	81.42
58	0.6342	3.981	1865	-	58	0.6342	3.981	1814	-
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	2658	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.34	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	23.14	87.45	64	0.01592	0.1	25.915	84.275
64	0.02531	0.1585	36.7	87.01	64	0.02531	0.1585	39.275	-
64	0.03995	0.2512	57.2	-	64	0.03995	0.2512	60.325	-
64	0.06334	0.3981	90.69	-	64	0.06334	0.3981	93.03	-
64	0.1004	0.631	140.5	-	64	0.1004	0.631	144.3	-

64	0.1592	1	216.9	-	64	0.1592	1	224.25	-
64	0.2532	1.585	335.5	-	64	0.2532	1.585	344.4	-
64	0.4	2.512	525.5	-	64	0.4	2.512	531.4	-
64	0.6342	3.981	798	-	64	0.6342	3.981	836.95	-
64	1.007	6.31	1216	-	64	1.007	6.31	1241.5	-
64	1.596	10	1961	-	64	1.596	10	2041.5	-
64	2.542	15.85	-	-	64	2.542	15.85	3072.5	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	5109	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	-	-
64	10.34	63.1	-	-	64	10.34	63.1	-	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	10.44	87.89	70	0.01592	0.1	11.895	83.36
70	0.02531	0.1585	16.33	87.37	70	0.02531	0.1585	18.1	-
70	0.03995	0.2512	25.56	-	70	0.03995	0.2512	27.815	-
70	0.06334	0.3981	39.72	-	70	0.06334	0.3981	42.665	-
70	0.1004	0.631	62.74	-	70	0.1004	0.631	65.535	-
70	0.1592	1	97.66	-	70	0.1592	1	101.8	-
70	0.2532	1.585	153.1	-	70	0.2532	1.585	158.3	-
70	0.4	2.512	235.4	-	70	0.4	2.512	244.55	-
70	0.6342	3.981	367.4	-	70	0.6342	3.981	375.8	-
70	1.007	6.31	579.3	-	70	1.007	6.31	587.55	-
70	1.596	10	884.6	-	70	1.596	10	906.95	-
70	2.542	15.85	1352	-	70	2.542	15.85	1356.5	-
70	4	25.12	2010	-	70	4	25.12	2068.5	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	3258	-
70	10.34	63.1	-	-	70	10.34	63.1	5152	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	5.252	87.65	76	0.01592	0.1	6.0305	83.675
76	0.02531	0.1585	8.211	87.2	76	0.02531	0.1585	8.965	-
76	0.03995	0.2512	12.77	87.14	76	0.03995	0.2512	13.635	-
76	0.06334	0.3981	19.88	86.93	76	0.06334	0.3981	21.165	-
76	0.1004	0.631	31.21	86.9	76	0.1004	0.631	32.63	-
76	0.1592	1	49.06	86.83	76	0.1592	1	50.265	-
76	0.2532	1.585	76.98	86.49	76	0.2532	1.585	77.985	-
76	0.4	2.512	119.7	86.23	76	0.4	2.512	121.3	-
76	0.6342	3.981	186.8	-	76	0.6342	3.981	188.15	-
76	1.007	6.31	289.8	-	76	1.007	6.31	293.7	-
76	1.596	10	454.3	-	76	1.596	10	458.4	-
76	2.542	15.85	701.7	-	76	2.542	15.85	709.75	-
76	4	25.12	1078	-	76	4	25.12	1083.5	-
76	6.383	39.81	1693	-	76	6.383	39.81	1690.5	-
76	10.34	63.1	-	-	76	10.34	63.1	2378	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 19. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Cadereyta.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	142900	66.07
10	0.02531	0.1585	191200	58.22
10	0.03995	0.2512	249400	-
10	0.06334	0.3981	316700	-
10	0.1004	0.631	453500	-
10	0.1592	1	649300	-
10	0.2532	1.585	-	-

Tabla 20. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Salina Cruz.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	108800	67.12
10	0.02531	0.1585	142800	62.34
10	0.03995	0.2512	190400	59.05
10	0.06334	0.3981	249000	-
10	0.1004	0.631	375600	-
10	0.1592	1	498700	-
10	0.2532	1.585	-	-

10	0.4	2.512	-	-	10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-	10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-	10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-	10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-	10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-	10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-	10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-	10	10.34	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-	10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	25230	-	16	0.01592	0.1	68360	66.94
16	0.02531	0.1585	94470	-	16	0.02531	0.1585	89110	63.71
16	0.03995	0.2512	132800	-	16	0.03995	0.2512	121300	61.16
16	0.06334	0.3981	181800	-	16	0.06334	0.3981	171300	-
16	0.1004	0.631	239200	-	16	0.1004	0.631	230400	-
16	0.1592	1	366100	-	16	0.1592	1	327400	-
16	0.2532	1.585	-	-	16	0.2532	1.585	450700	-
16	0.4	2.512	-	-	16	0.4	2.512	652200	-
16	0.6342	3.981	-	-	16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-	16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-	16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-	16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-	16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-	16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-	16	10.34	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-	16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	31950	69.61	22	0.01592	0.1	38110	66.01
22	0.02531	0.1585	45000	64.7	22	0.02531	0.1585	55450	63.82
22	0.03995	0.2512	61610	63.57	22	0.03995	0.2512	74440	-
22	0.06334	0.3981	84910	-	22	0.06334	0.3981	105200	-
22	0.1004	0.631	113600	-	22	0.1004	0.631	142700	-
22	0.1592	1	167500	-	22	0.1592	1	194000	-
22	0.2532	1.585	217700	-	22	0.2532	1.585	272900	-
22	0.4	2.512	304500	-	22	0.4	2.512	387100	-
22	0.6342	3.981	391600	-	22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-	22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-	22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-	22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-	22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-	22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-	22	10.34	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-	22	16.67	100	-	-
28	0.01592	0.1	12860	74.95	28	0.01592	0.1	14840	69.36
28	0.02531	0.1585	18180	69.53	28	0.02531	0.1585	21290	68.37
28	0.03995	0.2512	25650	68.67	28	0.03995	0.2512	29830	66.97
28	0.06334	0.3981	36270	68.2	28	0.06334	0.3981	41320	66.45
28	0.1004	0.631	50330	66.39	28	0.1004	0.631	57630	65.76
28	0.1592	1	71000	65.5	28	0.1592	1	80750	64.8
28	0.2532	1.585	98710	64.29	28	0.2532	1.585	113200	63.75
28	0.4	2.512	136400	62.94	28	0.4	2.512	157200	62.31
28	0.6342	3.981	203400	60.43	28	0.6342	3.981	215600	-
28	1.007	6.31	269100	-	28	1.007	6.31	319600	-
28	1.596	10	357600	-	28	1.596	10	-	-
28	2.542	15.85	527400	-	28	2.542	15.85	-	-
28	4	25.12	697600	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.35	63.1	-	-	28	10.34	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-

34	0.01592	0.1	4107	78.55	34	0.01592	0.1	4597	78.85
34	0.02531	0.1585	6194	74.53	34	0.02531	0.1585	6591	75.34
34	0.03995	0.2512	8824	73.17	34	0.03995	0.2512	9564	74.1
34	0.06334	0.3981	12710	72.06	34	0.06334	0.3981	14020	72.65
34	0.1004	0.631	18360	70.91	34	0.1004	0.631	20090	71.02
34	0.1592	1	26270	69.5	34	0.1592	1	28690	69.79
34	0.2532	1.585	36930	68.27	34	0.2532	1.585	40830	69.06
34	0.4	2.512	52570	67.22	34	0.4	2.512	58310	68.11
34	0.6342	3.981	73450	66.54	34	0.6342	3.981	81580	67.27
34	1.007	6.31	101900	66.51	34	1.007	6.31	116600	65.72
34	1.596	10	149700	64.34	34	1.596	10	155100	64.9
34	2.542	15.85	200800	62.97	34	2.542	15.85	224500	62.03
34	4	25.12	275700	61.29	34	4	25.12	320000	-
34	6.383	39.81	377900	-	34	6.383	39.81	-	-
34	10.35	63.1	-	-	34	10.34	63.1	-	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	1280	79.35	40	0.01592	0.1	1389	80.83
40	0.02531	0.1585	1941	78.16	40	0.02531	0.1585	2120	79.61
40	0.03995	0.2512	2897	76.94	40	0.03995	0.2512	3180	78.41
40	0.06334	0.3981	4282	75.6	40	0.06334	0.3981	4779	76.73
40	0.1004	0.631	6229	74.78	40	0.1004	0.631	7035	75.49
40	0.1592	1	9221	73.75	40	0.1592	1	10440	74.67
40	0.2532	1.585	13440	72	40	0.2532	1.585	15320	73.26
40	0.4	2.512	19580	71.14	40	0.4	2.512	22140	71.82
40	0.6342	3.981	28400	70.04	40	0.6342	3.981	31550	70.92
40	1.007	6.31	39970	69	40	1.007	6.31	46010	69.09
40	1.596	10	57170	67.47	40	1.596	10	64190	68.18
40	2.542	15.85	80410	66.26	40	2.542	15.85	91470	-
40	4	25.12	110400	65.69	40	4	25.12	129900	-
40	6.383	39.81	156300	-	40	6.383	39.81	187000	-
40	10.35	63.1	235700	-	40	10.34	63.1	-	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	-	-
46	0.01592	0.1	453.2	81.48	46	0.01592	0.1	502.8	84.54
46	0.02531	0.1585	680.8	78.98	46	0.02531	0.1585	778.4	82.37
46	0.03995	0.2512	1015	78.35	46	0.03995	0.2512	1182	81.63
46	0.06334	0.3981	1543	78.02	46	0.06334	0.3981	1778	80.64
46	0.1004	0.631	2311	77.44	46	0.1004	0.631	2662	79.45
46	0.1592	1	3520	76.04	46	0.1592	1	4017	77.97
46	0.2532	1.585	5150	75.23	46	0.2532	1.585	6010	76.94
46	0.4	2.512	7537	74.11	46	0.4	2.512	8797	75.49
46	0.6342	3.981	10910	72.78	46	0.6342	3.981	12870	74.33
46	1.007	6.31	15840	71.61	46	1.007	6.31	18810	73.39
46	1.596	10	22890	70.39	46	1.596	10	27350	72.1
46	2.542	15.85	32870	68.64	46	2.542	15.85	39500	71.15
46	4	25.12	46560	66.59	46	4	25.12	56490	70.28
46	6.383	39.81	-	64.14	46	6.383	39.81	77650	68.74
46	10.35	63.1	-	52.16	46	10.34	63.1	-	61.54
46	16.67	100	-	40.7	46	16.67	100	-	54.8
52	0.01592	0.1	97.11	87.96	52	0.01592	0.1	115	87.7
52	0.02531	0.1585	153	87.33	52	0.02531	0.1585	178.9	86.97
52	0.03995	0.2512	235.1	87.12	52	0.03995	0.2512	278.4	86.19
52	0.06334	0.3981	369.6	84.85	52	0.06334	0.3981	434.8	84.26
52	0.1004	0.631	567.7	84.78	52	0.1004	0.631	681.7	-
52	0.1592	1	901.7	82.92	52	0.1592	1	1053	-
52	0.2532	1.585	1421	-	52	0.2532	1.585	-	-
52	0.4	2.512	-	-	52	0.4	2.512	-	-
52	0.6342	3.981	-	-	52	0.6342	3.981	-	-

52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.34	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	39.43	89.05	58	0.01592	0.1	46.28	88.41
58	0.02531	0.1585	62.75	88.29	58	0.02531	0.1585	72.23	88.26
58	0.03995	0.2512	97.6	87.76	58	0.03995	0.2512	113.1	87.71
58	0.06334	0.3981	152.8	87.04	58	0.06334	0.3981	177.8	87.14
58	0.1004	0.631	241.2	86.24	58	0.1004	0.631	276.8	85.34
58	0.1592	1	376.6	85.62	58	0.1592	1	441.9	-
58	0.2532	1.585	575	84.09	58	0.2532	1.585	-	-
58	0.4	2.512	899.2	83.41	58	0.4	2.512	-	-
58	0.6342	3.981	-	-	58	0.6342	3.981	-	-
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	-	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.34	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	17.01	89.51	64	0.01592	0.1	20.15	89.22
64	0.02531	0.1585	26.74	89.3	64	0.02531	0.1585	31.65	88.98
64	0.03995	0.2512	42.51	88.87	64	0.03995	0.2512	49.63	88.6
64	0.06334	0.3981	66.8	88.52	64	0.06334	0.3981	78.28	88.15
64	0.1004	0.631	105.4	87.56	64	0.1004	0.631	122.3	87.4
64	0.1592	1	165.1	87.3	64	0.1592	1	193.4	87.17
64	0.2532	1.585	258.2	86.21	64	0.2532	1.585	302.3	86.01
64	0.4	2.512	403.6	85.75	64	0.4	2.512	470.5	84.28
64	0.6342	3.981	628.7	85.23	64	0.6342	3.981	-	81.6
64	1.007	6.31	976.5	84.74	64	1.007	6.31	-	-
64	1.596	10	1498	-	64	1.596	10	-	-
64	2.542	15.85	2252	-	64	2.542	15.85	-	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	-	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	-	-
64	10.34	63.1	-	-	64	10.34	63.1	-	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	7.825	89.9	70	0.01592	0.1	9.65	88.65
70	0.02531	0.1585	12.42	89.69	70	0.02531	0.1585	15.06	88.3
70	0.03995	0.2512	19.61	89.33	70	0.03995	0.2512	23.39	88.11
70	0.06334	0.3981	30.7	89.09	70	0.06334	0.3981	36.7	88.02
70	0.1004	0.631	48.89	88.88	70	0.1004	0.631	58.26	87.82
70	0.1592	1	76.93	88.34	70	0.1592	1	91.44	87.34
70	0.2532	1.585	121.4	87.94	70	0.2532	1.585	144.4	86.88
70	0.4	2.512	189.4	86.96	70	0.4	2.512	225.2	86.45
70	0.6342	3.981	297.5	86.77	70	0.6342	3.981	346.3	-
70	1.007	6.31	463.8	85.29	70	1.007	6.31	538.3	-
70	1.596	10	703.5	-	70	1.596	10	838.4	-
70	2.542	15.85	1098	-	70	2.542	15.85	-	-
70	4	25.12	1629	-	70	4	25.12	-	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	-	-
70	10.34	63.1	-	-	70	10.34	63.1	-	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	3.917	89.78	76	0.01592	0.1	5.087	87.43
76	0.02531	0.1585	6.3	89.72	76	0.02531	0.1585	7.946	86.9

76	0.03995	0.2512	9.864	89.69	76	0.03995	0.2512	12.22	86.87
76	0.06334	0.3981	15.62	89.58	76	0.06334	0.3981	18.89	-
76	0.1004	0.631	24.9	89.39	76	0.1004	0.631	29.33	-
76	0.1592	1	39.34	88.95	76	0.1592	1	46.17	-
76	0.2532	1.585	62.19	88.78	76	0.2532	1.585	72.39	-
76	0.4	2.512	98.13	88.43	76	0.4	2.512	113.9	-
76	0.6342	3.981	155.1	87.82	76	0.6342	3.981	178.2	-
76	1.007	6.31	245.6	86.82	76	1.007	6.31	276.6	-
76	1.596	10	382.6	85.92	76	1.596	10	430.6	-
76	2.542	15.85	590.8	-	76	2.542	15.85	670.7	-
76	4	25.12	927.3	-	76	4	25.12	-	-
76	6.383	39.81	1376	-	76	6.383	39.81	-	-
76	10.34	63.1	-	-	76	10.34	63.1	-	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 21. Barridos de Frecuencia del Asfalto Original para el Asfalto Proveniente de la Refinería de Altamira.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G^* (Pa)	δ
10	0.015915494	0.1	598095.3185	55.41
10	0.034281975	0.2154	964168.8026	53.38
10	0.073879725	0.4642	1518696.138	51.35
10	0.159154943	1	2342959.24	49.32
10	0.342819747	2.154	3544127.537	47.33
10	0.738797246	4.642	5269488.021	45.39
10	1.591549431	10	7712944.055	43.49
10	3.428197474	21.54	11104178.36	41.66
10	7.387972458	46.42	15690920.94	39.83
10	15.91549431	100	21865957.56	37.96
20	0.015915494	0.1	92526.49404	61.89
20	0.034281975	0.2154	156137.6409	60.36
20	0.073879725	0.4642	260713.6744	58.83
20	0.159154943	1	427625.1279	57.28
20	0.342819747	2.154	694339.6935	55.62
20	0.738797246	4.642	1108563.995	53.99
20	1.591549431	10	1744567.855	52.33
20	3.428197474	21.54	2710338.171	50.55
20	7.387972458	46.42	4130906.438	48.67
20	15.91549431	100	6223925.61	46.72
30	0.015915494	0.1	13218.00287	68.52
30	0.034281975	0.2154	23566.95152	67.29
30	0.073879725	0.4642	41603.7931	65.64
30	0.159154943	1	71991.57312	64.01
30	0.342819747	2.154	123637.7305	62.44
30	0.738797246	4.642	208719.8361	61.03
30	1.591549431	10	349104.1249	59.63
30	3.428197474	21.54	578265.3457	58.23
30	7.387972458	46.42	942612.8845	56.59
30	15.91549431	100	1527394.186	54.73
40	0.015915494	0.1	1771.983377	78.93
40	0.034281975	0.2154	3444.949754	77.1
40	0.073879725	0.4642	6593.38153	74.64
40	0.159154943	1	12301.604	72.15
40	0.342819747	2.154	22465.43345	69.84
40	0.738797246	4.642	40389.63357	67.82
40	1.591549431	10	71330.11215	66.07
40	3.428197474	21.54	124221.2256	64.36

40	7.387972458	46.42	215226.3016	62.32
40	15.91549431	100	375449.5172	59.86
50	0.015915494	0.1	194.8955056	86.35
50	0.034281975	0.2154	407.8424765	84.7
50	0.073879725	0.4642	837.2372722	82.72
50	0.159154943	1	1688.048874	80.52
50	0.342819747	2.154	3318.070959	78.2
50	0.738797246	4.642	6412.648205	75.88
50	1.591549431	10	12085.48224	73.71
50	3.428197474	21.54	22509.55533	71.77
50	7.387972458	46.42	40803.32462	70.12
50	15.91549431	100	73610.31042	68.67
60	0.015915494	0.1	40.25186356	88.61
60	0.034281975	0.2154	86.3980275	87.9
60	0.073879725	0.4642	182.7972276	86.73
60	0.159154943	1	382.4503394	85.18
60	0.342819747	2.154	786.9535554	83.38
60	0.738797246	4.642	1597.090195	81.37
60	1.591549431	10	3166.340689	79.27
60	3.428197474	21.54	6160.493243	77.14
60	7.387972458	46.42	11804.43883	75.14
60	15.91549431	100	22152.52918	73.23
70	0.015915494	0.1	11.01234398	88.82
70	0.034281975	0.2154	23.60426322	88.91
70	0.073879725	0.4642	50.72443395	88.63
70	0.159154943	1	108.3709205	87.93
70	0.342819747	2.154	229.2734097	86.73
70	0.738797246	4.642	478.6733752	85.21
70	1.591549431	10	987.3416683	83.45
70	3.428197474	21.54	1996.128493	81.46
70	7.387972458	46.42	3978.464278	79.36
70	15.91549431	100	7814.803644	77.18
80	0.015915494	0.1	3.475580389	88.27
80	0.034281975	0.2154	7.431049135	88.65
80	0.073879725	0.4642	15.93278895	88.93
80	0.159154943	1	34.21569962	88.95
80	0.342819747	2.154	73.57313725	88.56
80	0.738797246	4.642	156.8252699	87.71
80	1.591549431	10	331.2726521	86.35
80	3.428197474	21.54	692.9540545	84.53
80	7.387972458	46.42	1425.783732	82.32
80	15.91549431	100	2916.247467	79.78

Anexo B. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio sometidos al RTFOT.

Tabla 22. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Tula.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	1723000	-
10	0.02531	0.1585	2406000	-
10	0.03995	0.2512	4332000	-
10	0.06334	0.3981	-	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	1908000	48.03
16	0.02531	0.1585	1795000	-
16	0.03995	0.2512	-	-
16	0.06334	0.3981	-	-
16	0.1004	0.631	-	-
16	0.1592	1	-	-
16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	932300	-
22	0.02531	0.1585	1640000	-
22	0.03995	0.2512	2804000	-
22	0.06334	0.3981	-	-
22	0.1004	0.631	-	-
22	0.1592	1	-	-
22	0.2532	1.585	-	-
22	0.4	2.512	-	-
22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-

Tabla 23. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Salamanca.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	1275550	49.925
10	0.02531	0.1585	2339000	-
10	0.03995	0.2512	2765500	-
10	0.06334	0.3981	3035000	-
10	0.1004	0.631	4790000	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	679850	56.245
16	0.02531	0.1585	901650	51.93
16	0.03995	0.2512	1290500	48.025
16	0.06334	0.3981	1469000	43.805
16	0.1004	0.631	1727000	38.62
16	0.1592	1	2353000	-
16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	279100	58.2
22	0.02531	0.1585	349500	55.9
22	0.03995	0.2512	451600	54.805
22	0.06334	0.3981	628800	52.035
22	0.1004	0.631	780300	46.175
22	0.1592	1	1136150	-
22	0.2532	1.585	1306000	-
22	0.4	2.512	1603000	-
22	0.6342	3.981	2037000	-
22	1.007	6.31	2576000	-
22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-

22	16.67	100	-	-	22	16.67	100	-	-
28	0.01592	0.1	583600	49.58	28	0.01592	0.1	85605	65.025
28	0.02531	0.1585	702700	47.92	28	0.02531	0.1585	117950	60.22
28	0.03995	0.2512	874000	38.11	28	0.03995	0.2512	158100	59.24
28	0.06334	0.3981	1282000	-	28	0.06334	0.3981	214100	57.78
28	0.1004	0.631	-	-	28	0.1004	0.631	296100	-
28	0.1592	1	-	-	28	0.1592	1	375300	-
28	0.2532	1.585	-	-	28	0.2532	1.585	497900	-
28	0.4	2.512	-	-	28	0.4	2.512	620700	-
28	0.6342	3.981	-	-	28	0.6342	3.981	937900	-
28	1.007	6.31	-	-	28	1.007	6.31	1286000	-
28	1.596	10	-	-	28	1.596	10	1961000	-
28	2.542	15.85	-	-	28	2.542	15.85	2397000	-
28	4	25.12	-	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.35	63.1	-	-	28	10.35	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-
34	0.01592	0.1	232700	53.92	34	0.01592	0.1	29675	69.45
34	0.02531	0.1585	317200	49.99	34	0.02531	0.1585	40865	65.015
34	0.03995	0.2512	398700	48.62	34	0.03995	0.2512	56320	64.015
34	0.06334	0.3981	489200	-	34	0.06334	0.3981	77890	62.685
34	0.1004	0.631	648400	-	34	0.1004	0.631	107550	61.1
34	0.1592	1	881200	-	34	0.1592	1	149000	59.505
34	0.2532	1.585	-	-	34	0.2532	1.585	197500	-
34	0.4	2.512	-	-	34	0.4	2.512	270900	-
34	0.6342	3.981	-	-	34	0.6342	3.981	369900	-
34	1.007	6.31	-	-	34	1.007	6.31	487550	-
34	1.596	10	-	-	34	1.596	10	663200	-
34	2.542	15.85	-	-	34	2.542	15.85	858000	-
34	4	25.12	-	-	34	4	25.12	1194000	-
34	6.383	39.81	-	-	34	6.383	39.81	-	-
34	10.35	63.1	-	-	34	10.35	63.1	-	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	78290	61.82	40	0.01592	0.1	10270	73.24
40	0.02531	0.1585	97610	55.7	40	0.02531	0.1585	14665	69.555
40	0.03995	0.2512	127400	53.27	40	0.03995	0.2512	20445	68.135
40	0.06334	0.3981	169800	-	40	0.06334	0.3981	29025	66.975
40	0.1004	0.631	229900	-	40	0.1004	0.631	40650	65.84
40	0.1592	1	283500	-	40	0.1592	1	56840	64.23
40	0.2532	1.585	384000	-	40	0.2532	1.585	78220	62.85
40	0.4	2.512	475700	-	40	0.4	2.512	109750	-
40	0.6342	3.981	572100	-	40	0.6342	3.981	151400	-
40	1.007	6.31	673600	-	40	1.007	6.31	208450	-
40	1.596	10	-	-	40	1.596	10	283400	-
40	2.542	15.85	-	-	40	2.542	15.85	372050	-
40	4	25.12	-	-	40	4	25.12	547000	-
40	6.383	39.81	-	-	40	6.383	39.81	701400	-
40	10.35	63.1	-	-	40	10.35	63.1	-	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	-	-
46	0.01592	0.1	29690	61.43	46	0.01592	0.1	3403.5	76.535
46	0.02531	0.1585	41260	59.17	46	0.02531	0.1585	4938	74.13
46	0.03995	0.2512	55720	57.62	46	0.03995	0.2512	7129	72.425
46	0.06334	0.3981	73320	56.15	46	0.06334	0.3981	10292	70.965
46	0.1004	0.631	98930	-	46	0.1004	0.631	14865	69.82
46	0.1592	1	135900	-	46	0.1592	1	21340	68.58
46	0.2532	1.585	172600	-	46	0.2532	1.585	30235	66.815
46	0.4	2.512	225000	-	46	0.4	2.512	42500	65.955

46	0.6342	3.981	290200	-	46	0.6342	3.981	59185	65.305
46	1.007	6.31	405200	-	46	1.007	6.31	82505	64.09
46	1.596	10	493500	-	46	1.596	10	113950	63.31
46	2.542	15.85	-	-	46	2.542	15.85	159250	62.175
46	4	25.12	-	-	46	4	25.12	211600	61.97
46	6.383	39.81	-	-	46	6.383	39.81	280700	57.98
46	10.35	63.1	-	-	46	10.35	63.1	368600	54.98
46	16.67	100	-	-	46	16.67	100	-	48.93
52	0.01592	0.1	767.6	82.16	52	0.01592	0.1	836.35	76.685
52	0.02531	0.1585	1135	76.26	52	0.02531	0.1585	1244	76.085
52	0.03995	0.2512	1753	74.42	52	0.03995	0.2512	1829.5	-
52	0.06334	0.3981	2490	-	52	0.06334	0.3981	2593	-
52	0.1004	0.631	3620	-	52	0.1004	0.631	4693	-
52	0.1592	1	5273	-	52	0.1592	1	-	-
52	0.2532	1.585	8674	-	52	0.2532	1.585	-	-
52	0.4	2.512	13570	-	52	0.4	2.512	-	-
52	0.6342	3.981	-	-	52	0.6342	3.981	-	-
52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.34	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	301.8	84.01	58	0.01592	0.1	327	80.845
58	0.02531	0.1585	450.8	80.84	58	0.02531	0.1585	496.05	79.99
58	0.03995	0.2512	694.8	-	58	0.03995	0.2512	758.65	78.8
58	0.06334	0.3981	1017	-	58	0.06334	0.3981	1122.5	76.795
58	0.1004	0.631	1478	-	58	0.1004	0.631	1714.5	76.275
58	0.1592	1	2244	-	58	0.1592	1	2679	74.15
58	0.2532	1.585	3654	-	58	0.2532	1.585	3982	65.255
58	0.4	2.512	-	-	58	0.4	2.512	-	63.93
58	0.6342	3.981	-	-	58	0.6342	3.981	-	-
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	-	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.34	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	113.8	84.77	64	0.01592	0.1	120.2	82.4
64	0.02531	0.1585	176.6	84.52	64	0.02531	0.1585	181.7	81.47
64	0.03995	0.2512	268.2	82.86	64	0.03995	0.2512	274.4	81.405
64	0.06334	0.3981	411.1	81.91	64	0.06334	0.3981	412.35	80.56
64	0.1004	0.631	615.5	81.03	64	0.1004	0.631	631.95	80.42
64	0.1592	1	945.4	-	64	0.1592	1	945.35	80.13
64	0.2532	1.585	1474	-	64	0.2532	1.585	1382	77.715
64	0.4	2.512	2288	-	64	0.4	2.512	2129.5	-
64	0.6342	3.981	-	-	64	0.6342	3.981	3707	-
64	1.007	6.31	-	-	64	1.007	6.31	5275	-
64	1.596	10	-	-	64	1.596	10	7390	-
64	2.542	15.85	-	-	64	2.542	15.85	10230	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	-	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	-	-
64	10.34	63.1	-	-	64	10.34	63.1	-	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	45.99	85.57	70	0.01592	0.1	46.83	82.23

70	0.02531	0.1585	70.9	85.47	70	0.02531	0.1585	72.11	81.85
70	0.03995	0.2512	109	84.99	70	0.03995	0.2512	109.65	81.795
70	0.06334	0.3981	168.8	83.25	70	0.06334	0.3981	168.15	-
70	0.1004	0.631	256.5	83.15	70	0.1004	0.631	257.55	-
70	0.1592	1	397.2	82.39	70	0.1592	1	391.3	-
70	0.2532	1.585	591.2	79.86	70	0.2532	1.585	601.55	-
70	0.4	2.512	906.5	-	70	0.4	2.512	895.5	-
70	0.6342	3.981	1357	-	70	0.6342	3.981	1391.5	-
70	1.007	6.31	2104	-	70	1.007	6.31	1879	-
70	1.596	10	3406	-	70	1.596	10	-	-
70	2.542	15.85	-	-	70	2.542	15.85	-	-
70	4	25.12	-	-	70	4	25.12	-	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	-	-
70	10.34	63.1	-	-	70	10.34	63.1	-	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	19.92	86.34	76	0.01592	0.1	22.11	81.565
76	0.02531	0.1585	30.86	84.66	76	0.02531	0.1585	32.36	-
76	0.03995	0.2512	48.3	-	76	0.03995	0.2512	49.18	-
76	0.06334	0.3981	74.44	-	76	0.06334	0.3981	75.085	-
76	0.1004	0.631	115.4	-	76	0.1004	0.631	116	-
76	0.1592	1	180.1	-	76	0.1592	1	177.1	-
76	0.2532	1.585	276.4	-	76	0.2532	1.585	266.95	-
76	0.4	2.512	415.4	-	76	0.4	2.512	412.6	-
76	0.6342	3.981	641.7	-	76	0.6342	3.981	627.15	-
76	1.007	6.31	964.3	-	76	1.007	6.31	955.2	-
76	1.596	10	-	-	76	1.596	10	1439.5	-
76	2.542	15.85	-	-	76	2.542	15.85	2140.5	-
76	4	25.12	-	-	76	4	25.12	3085	-
76	6.383	39.81	-	-	76	6.383	39.81	4001	-
76	10.34	63.1	-	-	76	10.34	63.1	-	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 24. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Cadereyta.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	356000	57.77
10	0.02531	0.1585	506400	53.78
10	0.03995	0.2512	646800	-
10	0.06334	0.3981	894600	-
10	0.1004	0.631	1251000	-
10	0.1592	1	1581000	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.34	63.1	-	-
10	16.67	100	4181000	-
16	0.01592	0.1	263500	54.4
16	0.02531	0.1585	380800	51.98
16	0.03995	0.2512	455200	51.02

Tabla 25. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Salina Cruz.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	405600	59.39
10	0.02531	0.1585	525500	56.65
10	0.03995	0.2512	779700	49.67
10	0.06334	0.3981	1007000	-
10	0.1004	0.631	1433000	-
10	0.1592	1	1832000	-
10	0.2532	1.585	2925000	-
10	0.4	2.512	4673000	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.34	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	300000	60.35
16	0.02531	0.1585	375600	52.64
16	0.03995	0.2512	508900	-

16	0.06334	0.3981	605900	41.87	16	0.06334	0.3981	611000	-
16	0.1004	0.631	803500	-	16	0.1004	0.631	850700	-
16	0.1592	1	-	-	16	0.1592	1	1039000	-
16	0.2532	1.585	-	-	16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-	16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-	16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-	16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-	16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-	16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-	16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-	16	6.383	39.81	-	-
16	10.34	63.1	-	-	16	10.34	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-	16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	131100	57.25	22	0.01592	0.1	149700	55.28
22	0.02531	0.1585	187900	53.92	22	0.02531	0.1585	210600	-
22	0.03995	0.2512	238100	53.72	22	0.03995	0.2512	248600	-
22	0.06334	0.3981	334500	48.58	22	0.06334	0.3981	371700	-
22	0.1004	0.631	438400	-	22	0.1004	0.631	489000	-
22	0.1592	1	530400	-	22	0.1592	1	633500	-
22	0.2532	1.585	728600	-	22	0.2532	1.585	761700	-
22	0.4	2.512	-	-	22	0.4	2.512	1037000	-
22	0.6342	3.981	-	-	22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-	22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-	22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-	22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-	22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-	22	6.383	39.81	-	-
22	10.34	63.1	-	-	22	10.34	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-	22	16.67	100	-	-
28	0.01592	0.1	59460	60.43	28	0.01592	0.1	74610	64.51
28	0.02531	0.1585	75610	59.26	28	0.02531	0.1585	97780	58.7
28	0.03995	0.2512	101500	57.73	28	0.03995	0.2512	129100	-
28	0.06334	0.3981	137800	56.99	28	0.06334	0.3981	176200	-
28	0.1004	0.631	175800	56.36	28	0.1004	0.631	221600	-
28	0.1592	1	247800	-	28	0.1592	1	316100	-
28	0.2532	1.585	333000	-	28	0.2532	1.585	409200	-
28	0.4	2.512	-	-	28	0.4	2.512	531100	-
28	0.6342	3.981	-	-	28	0.6342	3.981	696500	-
28	1.007	6.31	-	-	28	1.007	6.31	999800	-
28	1.596	10	-	-	28	1.596	10	1205000	-
28	2.542	15.85	-	-	28	2.542	15.85	1415000	-
28	4	25.12	-	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.34	63.1	-	-	28	10.34	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-
34	0.01592	0.1	19960	65.77	34	0.01592	0.1	28010	64.12
34	0.02531	0.1585	28640	62.45	34	0.02531	0.1585	37540	63.15
34	0.03995	0.2512	38750	61.05	34	0.03995	0.2512	51100	62.27
34	0.06334	0.3981	51950	60.15	34	0.06334	0.3981	70640	59.83
34	0.1004	0.631	71460	-	34	0.1004	0.631	95130	57.84
34	0.1592	1	96540	-	34	0.1592	1	123600	57.47
34	0.2532	1.585	129100	-	34	0.2532	1.585	171300	55.38
34	0.4	2.512	179400	-	34	0.4	2.512	227100	-
34	0.6342	3.981	-	-	34	0.6342	3.981	305400	-
34	1.007	6.31	-	-	34	1.007	6.31	402400	-
34	1.596	10	-	-	34	1.596	10	531900	-
34	2.542	15.85	-	-	34	2.542	15.85	-	-

34	4	25.12	-	-	34	4	25.12	-	-
34	6.383	39.81	-	-	34	6.383	39.81	-	-
34	10.34	63.1	-	-	34	10.34	63.1	-	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	7190	71.49	40	0.01592	0.1	10070	72.64
40	0.02531	0.1585	10570	67.88	40	0.02531	0.1585	14350	67.14
40	0.03995	0.2512	14690	66.13	40	0.03995	0.2512	19950	65.78
40	0.06334	0.3981	20290	64.99	40	0.06334	0.3981	27500	63.99
40	0.1004	0.631	28170	63.98	40	0.1004	0.631	38830	63.62
40	0.1592	1	39120	63.2	40	0.1592	1	52430	62.6
40	0.2532	1.585	53520	61.52	40	0.2532	1.585	70510	60.9
40	0.4	2.512	73810	60.31	40	0.4	2.512	98890	60.86
40	0.6342	3.981	98590	60.17	40	0.6342	3.981	133000	-
40	1.007	6.31	132200	57.39	40	1.007	6.31	183900	-
40	1.596	10	189100	55.84	40	1.596	10	257800	-
40	2.542	15.85	-	52.8	40	2.542	15.85	341000	-
40	4	25.12	-	-	40	4	25.12	428300	-
40	6.383	39.81	-	-	40	6.383	39.81	566700	-
40	10.34	63.1	-	-	40	10.34	63.1	752300	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	1009000	-
46	0.01592	0.1	2716	74.35	46	0.01592	0.1	4381	73.16
46	0.02531	0.1585	4105	72.27	46	0.02531	0.1585	6416	71.56
46	0.03995	0.2512	6050	70.49	46	0.03995	0.2512	9081	69.58
46	0.06334	0.3981	8698	68.72	46	0.06334	0.3981	12920	67.78
46	0.1004	0.631	12260	67.66	46	0.1004	0.631	18400	66.69
46	0.1592	1	17240	66.56	46	0.1592	1	26060	65.86
46	0.2532	1.585	24460	64.33	46	0.2532	1.585	36700	64.23
46	0.4	2.512	34090	63.3	46	0.4	2.512	49690	63.65
46	0.6342	3.981	46670	62.34	46	0.6342	3.981	67510	61.96
46	1.007	6.31	63190	62.17	46	1.007	6.31	88890	60.37
46	1.596	10	86670	61.46	46	1.596	10	124000	-
46	2.542	15.85	122200	59.03	46	2.542	15.85	166800	-
46	4	25.12	159200	-	46	4	25.12	217900	-
46	6.383	39.81	221700	-	46	6.383	39.81	307400	-
46	10.34	63.1	-	-	46	10.34	63.1	430700	-
46	16.67	100	-	-	46	16.67	100	520600	-
52	0.01592	0.1	759.4	78.84	52	0.01592	0.1	117.6	87.3
52	0.02531	0.1585	1214	78.41	52	0.02531	0.1585	187.5	87.01
52	0.03995	0.2512	1707	77.64	52	0.03995	0.2512	283.8	86.06
52	0.06334	0.3981	-	70.6	52	0.06334	0.3981	442.8	85.02
52	0.1004	0.631	-	-	52	0.1004	0.631	672.8	84.09
52	0.1592	1	-	-	52	0.1592	1	983.9	81.44
52	0.2532	1.585	-	-	52	0.2532	1.585	1284	-
52	0.4	2.512	-	-	52	0.4	2.512	-	-
52	0.6342	3.981	-	-	52	0.6342	3.981	-	-
52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.34	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	349.5	83.27	58	0.01592	0.1	41.37	89.1
58	0.02531	0.1585	520.9	80.78	58	0.02531	0.1585	65.16	88.5
58	0.03995	0.2512	801.5	76.79	58	0.03995	0.2512	102.6	88.14
58	0.06334	0.3981	1149	-	58	0.06334	0.3981	161	87.38
58	0.1004	0.631	-	-	58	0.1004	0.631	248.6	86.53

58	0.1592	1	-	-	58	0.1592	1	388	85.37
58	0.2532	1.585	-	-	58	0.2532	1.585	612.4	84.78
58	0.4	2.512	-	-	58	0.4	2.512	967.8	83.72
58	0.6342	3.981	-	-	58	0.6342	3.981	1490	79.59
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	2219	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.34	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	146.7	85.99	64	0.01592	0.1	19.28	89.28
64	0.02531	0.1585	226.5	83.74	64	0.02531	0.1585	33.31	88.98
64	0.03995	0.2512	337.1	82.72	64	0.03995	0.2512	51.71	88.64
64	0.06334	0.3981	513.5	80.36	64	0.06334	0.3981	81.54	88.19
64	0.1004	0.631	791.3	79.65	64	0.1004	0.631	126.9	87.5
64	0.1592	1	1165	-	64	0.1592	1	197.5	86.94
64	0.2532	1.585	-	-	64	0.2532	1.585	308.7	86.14
64	0.4	2.512	-	-	64	0.4	2.512	482.3	84.88
64	0.6342	3.981	-	-	64	0.6342	3.981	747.9	82.08
64	1.007	6.31	-	-	64	1.007	6.31	1168	-
64	1.596	10	-	-	64	1.596	10	1809	-
64	2.542	15.85	-	-	64	2.542	15.85	2630	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	3879	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	5459	-
64	10.34	63.1	-	-	64	10.34	63.1	7393	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	68.71	86.95	70	0.01592	0.1	9.81	88.51
70	0.02531	0.1585	106.2	85.86	70	0.02531	0.1585	15.53	88.33
70	0.03995	0.2512	160.2	85.01	70	0.03995	0.2512	24.43	88.15
70	0.06334	0.3981	247.4	83.52	70	0.06334	0.3981	38.22	88.07
70	0.1004	0.631	375.2	82.21	70	0.1004	0.631	60.1	87.91
70	0.1592	1	593.5	81.11	70	0.1592	1	94.64	87.58
70	0.2532	1.585	881.2	77.63	70	0.2532	1.585	148.6	87.48
70	0.4	2.512	1335	-	70	0.4	2.512	231.7	86.87
70	0.6342	3.981	2115	-	70	0.6342	3.981	371.3	-
70	1.007	6.31	-	-	70	1.007	6.31	569	-
70	1.596	10	-	-	70	1.596	10	879.1	-
70	2.542	15.85	-	-	70	2.542	15.85	1305	-
70	4	25.12	-	-	70	4	25.12	2196	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	3143	-
70	10.34	63.1	-	-	70	10.34	63.1	3977	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	30.37	87.97	76	0.01592	0.1	5.026	87.8
76	0.02531	0.1585	47.68	87.5	76	0.02531	0.1585	8.076	87.41
76	0.03995	0.2512	75.56	86.61	76	0.03995	0.2512	12.75	87.32
76	0.06334	0.3981	119	85.65	76	0.06334	0.3981	19.94	87.18
76	0.1004	0.631	180.7	84.76	76	0.1004	0.631	31.45	-
76	0.1592	1	273.9	83.34	76	0.1592	1	48.88	-
76	0.2532	1.585	431.9	81.98	76	0.2532	1.585	76.53	-
76	0.4	2.512	662.1	79.51	76	0.4	2.512	119.1	-
76	0.6342	3.981	1018	-	76	0.6342	3.981	184.9	-
76	1.007	6.31	1587	-	76	1.007	6.31	290.2	-
76	1.596	10	-	-	76	1.596	10	451.3	-
76	2.542	15.85	-	-	76	2.542	15.85	699.5	-
76	4	25.12	-	-	76	4	25.12	1072	-
76	6.383	39.81	-	-	76	6.383	39.81	1741	-

76	10.34	63.1	-	-	76	10.34	63.1	2640	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 26. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por el RTFOT para el Asfalto de Altamira.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.015915494	0.1	1626051.967	47.72
10	0.034281975	0.2154	2433381.392	45.77
10	0.073879725	0.4642	3567959.781	43.94
10	0.159154943	1	5140366.232	42.22
10	0.342819747	2.154	7305676.218	40.57
10	0.738797246	4.642	10230765.37	38.95
10	1.591549431	10	14141034.23	37.48
10	3.428197474	21.54	19327332.98	35.53
10	7.387972458	46.42	25949643.54	34.13
10	15.91549431	100	34496128.77	32.72
20	0.015915494	0.1	316863.6458	53.4
20	0.034281975	0.2154	497628.1041	51.73
20	0.073879725	0.4642	769591.6969	50.13
20	0.159154943	1	1174890.718	48.64
20	0.342819747	2.154	1764151.071	47.23
20	0.738797246	4.642	2617291.157	45.86
20	1.591549431	10	3848250.771	44.45
20	3.428197474	21.54	5578496.751	42.92
20	7.387972458	46.42	7975893.931	41.45
20	15.91549431	100	11250534.3	40
30	0.015915494	0.1	54876.68813	60.27
30	0.034281975	0.2154	90834.23143	58.25
30	0.073879725	0.4642	147850.6615	56.51
30	0.159154943	1	237003.8185	54.99
30	0.342819747	2.154	377249.5195	53.53
30	0.738797246	4.642	590683.4855	52.29
30	1.591549431	10	914670.4871	51.11
30	3.428197474	21.54	1405608.893	49.88
30	7.387972458	46.42	2134789.217	48.63
30	15.91549431	100	3198712.554	47.3
40	0.015915494	0.1	9233.518073	68.93
40	0.034281975	0.2154	16365.46669	66.26
40	0.073879725	0.4642	28376.13434	63.76
40	0.159154943	1	48333.21943	61.58
40	0.342819747	2.154	80584.81309	59.75
40	0.738797246	4.642	132459.239	58.3
40	1.591549431	10	215794.4624	57
40	3.428197474	21.54	348142.7294	55.82
40	7.387972458	46.42	555352.4737	54.64
40	15.91549431	100	883068.7006	53.38
50	0.015915494	0.1	1330.235257	78.39
50	0.034281975	0.2154	2578.405564	75.39
50	0.073879725	0.4642	4855.806627	72.35
50	0.159154943	1	8885.532061	69.48
50	0.342819747	2.154	15800.81723	66.95
50	0.738797246	4.642	27609.74466	64.78
50	1.591549431	10	47334.54236	62.98
50	3.428197474	21.54	79815.53984	61.58
50	7.387972458	46.42	133390.6758	60.5
50	15.91549431	100	219991.0225	59.58

60	0.015915494	0.1	265.3954146	84.34
60	0.034281975	0.2154	543.8645972	82.02
60	0.073879725	0.4642	1087.364704	79.46
60	0.159154943	1	2121.924655	76.7
60	0.342819747	2.154	4028.936584	73.91
60	0.738797246	4.642	7477.327397	71.24
60	1.591549431	10	13520.97411	68.84
60	3.428197474	21.54	23969.33301	66.79
60	7.387972458	46.42	41685.83692	65.16
60	15.91549431	100	71376.69087	63.8
70	0.015915494	0.1	58.5881515	87.93
70	0.034281975	0.2154	124.2333583	86.49
70	0.073879725	0.4642	258.9352205	84.63
70	0.159154943	1	530.5676968	82.48
70	0.342819747	2.154	1065.982744	80.07
70	0.738797246	4.642	2087.197703	77.54
70	1.591549431	10	3985.208903	74.98
70	3.428197474	21.54	7471.271712	72.51
70	7.387972458	46.42	13661.65879	70.28
70	15.91549431	100	24486.56262	68.3
80	0.015915494	0.1	14.93160758	89.16
80	0.034281975	0.2154	32.07799847	88.72
80	0.073879725	0.4642	68.59789697	87.86
80	0.159154943	1	145.3832626	86.42
80	0.342819747	2.154	302.3321394	84.62
80	0.738797246	4.642	619.190603	82.5
80	1.591549431	10	1244.228612	80.18
80	3.428197474	21.54	2440.625455	77.74
80	7.387972458	46.42	4690.769766	75.24
80	15.91549431	100	8850.357394	72.68

Anexo C. Barridos de frecuencia en un rango de temperatura de 10-76°C a los asfaltos en estudio sometidos por PAV.

Tabla 27. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Tula.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	4613000	41.11
10	0.02531	0.1585	-	-
10	0.03995	0.2512	-	-
10	0.06334	0.3981	-	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	2366000	56.19
16	0.02531	0.1585	3169000	-
16	0.03995	0.2512	3735000	-
16	0.06334	0.3981	-	-
16	0.1004	0.631	-	-
16	0.1592	1	-	-
16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	1146000	-
22	0.02531	0.1585	1499000	-
22	0.03995	0.2512	1687000	-
22	0.06334	0.3981	1817000	-
22	0.1004	0.631	-	-
22	0.1592	1	-	-
22	0.2532	1.585	-	-
22	0.4	2.512	-	-
22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-

Tabla 28. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Salamanca.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	5065000	-
10	0.02531	0.1585	-	-
10	0.03995	0.2512	-	-
10	0.06334	0.3981	-	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.35	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	2265000	46.02
16	0.02531	0.1585	2556000	-
16	0.03995	0.2512	2878000	-
16	0.06334	0.3981	3840000	-
16	0.1004	0.631	-	-
16	0.1592	1	-	-
16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-
16	10.35	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	1260000	52.76
22	0.02531	0.1585	1724000	29.49
22	0.03995	0.2512	1822000	-
22	0.06334	0.3981	1813000	-
22	0.1004	0.631	-	-
22	0.1592	1	-	-
22	0.2532	1.585	-	-
22	0.4	2.512	-	-
22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-
22	10.35	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-

28	0.01592	0.1	684400	44.6	28	0.01592	0.1	615000	49.9
28	0.02531	0.1585	685300	41.94	28	0.02531	0.1585	735100	-
28	0.03995	0.2512	922700	40.09	28	0.03995	0.2512	890900	-
28	0.06334	0.3981	1123000	36.28	28	0.06334	0.3981	1046000	-
28	0.1004	0.631	1382000	30.26	28	0.1004	0.631	1131000	-
28	0.1592	1	-	-	28	0.1592	1	1397000	-
28	0.2532	1.585	-	-	28	0.2532	1.585	-	-
28	0.4	2.512	-	-	28	0.4	2.512	-	-
28	0.6342	3.981	-	-	28	0.6342	3.981	-	-
28	1.007	6.31	-	-	28	1.007	6.31	-	-
28	1.596	10	-	-	28	1.596	10	-	-
28	2.542	15.85	-	-	28	2.542	15.85	-	-
28	4	25.12	-	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.35	63.1	-	-	28	10.35	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-
34	0.01592	0.1	286400	57.01	34	0.01592	0.1	246800	56.91
34	0.02531	0.1585	317500	47.03	34	0.02531	0.1585	306000	50.95
34	0.03995	0.2512	413200	-	34	0.03995	0.2512	385900	-
34	0.06334	0.3981	524900	-	34	0.06334	0.3981	513700	-
34	0.1004	0.631	724900	-	34	0.1004	0.631	672900	-
34	0.1592	1	-	-	34	0.1592	1	798400	-
34	0.2532	1.585	-	-	34	0.2532	1.585	-	-
34	0.4	2.512	-	-	34	0.4	2.512	-	-
34	0.6342	3.981	-	-	34	0.6342	3.981	-	-
34	1.007	6.31	-	-	34	1.007	6.31	-	-
34	1.596	10	-	-	34	1.596	10	-	-
34	2.542	15.85	-	-	34	2.542	15.85	-	-
34	4	25.12	-	-	34	4	25.12	-	-
34	6.383	39.81	-	-	34	6.383	39.81	-	-
34	10.35	63.1	-	-	34	10.35	63.1	-	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	103400	54.68	40	0.01592	0.1	86820	57.77
40	0.02531	0.1585	128300	53.51	40	0.02531	0.1585	120300	55.59
40	0.03995	0.2512	168500	52.35	40	0.03995	0.2512	160000	52.5
40	0.06334	0.3981	209500	51.05	40	0.06334	0.3981	206000	51.96
40	0.1004	0.631	268000	49.22	40	0.1004	0.631	246300	47.64
40	0.1592	1	324600	48.46	40	0.1592	1	341000	-
40	0.2532	1.585	435700	47.31	40	0.2532	1.585	454400	-
40	0.4	2.512	561400	46.25	40	0.4	2.512	533500	-
40	0.6342	3.981	854000	-	40	0.6342	3.981	-	-
40	1.007	6.31	1028000	-	40	1.007	6.31	-	-
40	1.596	10	1138000	-	40	1.596	10	-	-
40	2.542	15.85	1440000	-	40	2.542	15.85	-	-
40	4	25.12	1851000	-	40	4	25.12	-	-
40	6.383	39.81	-	-	40	6.383	39.81	-	-
40	10.35	63.1	-	-	40	10.35	63.1	-	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	-	-
46	0.01592	0.1	33750	58.99	46	0.01592	0.1	34990	65.93
46	0.02531	0.1585	46700	57.77	46	0.02531	0.1585	47750	59.86
46	0.03995	0.2512	60070	56.32	46	0.03995	0.2512	64230	58.25
46	0.06334	0.3981	77730	55.81	46	0.06334	0.3981	88020	57.25
46	0.1004	0.631	103600	52.91	46	0.1004	0.631	118800	56.99
46	0.1592	1	143200	52.47	46	0.1592	1	154900	55.17
46	0.2532	1.585	184000	50.86	46	0.2532	1.585	196800	53.07
46	0.4	2.512	245400	48.08	46	0.4	2.512	261700	52.47
46	0.6342	3.981	315400	47.14	46	0.6342	3.981	339200	48.28

46	1.007	6.31	385600	-	46	1.007	6.31	466500	-
46	1.596	10	530500	-	46	1.596	10	583300	-
46	2.542	15.85	-	-	46	2.542	15.85	746100	-
46	4	25.12	-	-	46	4	25.12	917500	-
46	6.383	39.81	-	-	46	6.383	39.81	-	-
46	10.35	63.1	-	-	46	10.35	63.1	-	-
46	16.67	100	-	-	46	16.67	100	-	-
52	0.01592	0.1	10350	79.9	52	0.01592	0.1	8816.5	68.855
52	0.02531	0.1585	13720	71.58	52	0.02531	0.1585	9772	-
52	0.03995	0.2512	16100	65.69	52	0.03995	0.2512	-	-
52	0.06334	0.3981	-	-	52	0.06334	0.3981	-	-
52	0.1004	0.631	-	-	52	0.1004	0.631	-	-
52	0.1592	1	-	-	52	0.1592	1	-	-
52	0.2532	1.585	-	-	52	0.2532	1.585	-	-
52	0.4	2.512	-	-	52	0.4	2.512	-	-
52	0.6342	3.981	-	-	52	0.6342	3.981	-	-
52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.35	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	3668	73.63	58	0.01592	0.1	3125	71.22
58	0.02531	0.1585	4808	66.2	58	0.02531	0.1585	4822.5	70.73
58	0.03995	0.2512	7526	66.16	58	0.03995	0.2512	5750	64.675
58	0.06334	0.3981	11120	-	58	0.06334	0.3981	-	53.26
58	0.1004	0.631	-	-	58	0.1004	0.631	-	-
58	0.1592	1	-	-	58	0.1592	1	-	-
58	0.2532	1.585	-	-	58	0.2532	1.585	-	-
58	0.4	2.512	-	-	58	0.4	2.512	-	-
58	0.6342	3.981	-	-	58	0.6342	3.981	-	-
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	-	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.35	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	1346	74.66	64	0.01592	0.1	1127.5	77.355
64	0.02531	0.1585	1911	71.3	64	0.02531	0.1585	1692	74.325
64	0.03995	0.2512	2886	-	64	0.03995	0.2512	2795.5	70.45
64	0.06334	0.3981	-	-	64	0.06334	0.3981	3550	-
64	0.1004	0.631	-	-	64	0.1004	0.631	5271	-
64	0.1592	1	-	-	64	0.1592	1	-	-
64	0.2532	1.585	-	-	64	0.2532	1.585	-	-
64	0.4	2.512	-	-	64	0.4	2.512	-	-
64	0.6342	3.981	-	-	64	0.6342	3.981	-	-
64	1.007	6.31	-	-	64	1.007	6.31	-	-
64	1.596	10	-	-	64	1.596	10	-	-
64	2.542	15.85	-	-	64	2.542	15.85	-	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	-	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	-	-
64	10.35	63.1	-	-	64	10.34	63.1	-	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	516.1	78.85	70	0.01592	0.1	459.1	80.72
70	0.02531	0.1585	753.6	77.03	70	0.02531	0.1585	684.5	78.69

70	0.03995	0.2512	1208	76.96	70	0.03995	0.2512	1023.9	76.46
70	0.06334	0.3981	1617	75.69	70	0.06334	0.3981	1459.5	72.12
70	0.1004	0.631	2492	73.35	70	0.1004	0.631	2092.5	-
70	0.1592	1	3354	-	70	0.1592	1	3014	-
70	0.2532	1.585	4482	-	70	0.2532	1.585	4703	-
70	0.4	2.512	6240	-	70	0.4	2.512	-	-
70	0.6342	3.981	-	-	70	0.6342	3.981	-	-
70	1.007	6.31	-	-	70	1.007	6.31	-	-
70	1.596	10	-	-	70	1.596	10	-	-
70	2.542	15.85	-	-	70	2.542	15.85	-	-
70	4	25.12	-	-	70	4	25.12	-	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	-	-
70	10.35	63.1	-	-	70	10.34	63.1	-	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	212.2	82.96	76	0.01592	0.1	177.25	83.7
76	0.02531	0.1585	326.2	81.97	76	0.02531	0.1585	273.3	81.89
76	0.03995	0.2512	504.4	80.68	76	0.03995	0.2512	410.1	80.61
76	0.06334	0.3981	740.1	78.54	76	0.06334	0.3981	635	78.25
76	0.1004	0.631	1089	77.13	76	0.1004	0.631	953.8	-
76	0.1592	1	1601	73.18	76	0.1592	1	1405.5	-
76	0.2532	1.585	2332	-	76	0.2532	1.585	2001	-
76	0.4	2.512	3658	-	76	0.4	2.512	3089.5	-
76	0.6342	3.981	5082	-	76	0.6342	3.981	4612.5	-
76	1.007	6.31	-	-	76	1.007	6.31	6882	-
76	1.596	10	-	-	76	1.596	10	9241	-
76	2.542	15.85	-	-	76	2.542	15.85	13030	-
76	4	25.12	-	-	76	4	25.12	-	-
76	6.383	39.81	-	-	76	6.383	39.81	-	-
76	10.35	63.1	-	-	76	10.34	63.1	-	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 29. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Cadereyta.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	-	47.8
10	0.02531	0.1585	-	-
10	0.03995	0.2512	-	-
10	0.06334	0.3981	-	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.34	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	924800	47.49
16	0.02531	0.1585	2345000	21.36
16	0.03995	0.2512	-	-
16	0.06334	0.3981	-	-
16	0.1004	0.631	-	-

Tabla 30. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Salina Cruz.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.01592	0.1	1549000	52.22
10	0.02531	0.1585	2859000	43.07
10	0.03995	0.2512	3446000	-
10	0.06334	0.3981	4454000	-
10	0.1004	0.631	-	-
10	0.1592	1	-	-
10	0.2532	1.585	-	-
10	0.4	2.512	-	-
10	0.6342	3.981	-	-
10	1.007	6.31	-	-
10	1.596	10	-	-
10	2.542	15.85	-	-
10	4	25.12	-	-
10	6.383	39.81	-	-
10	10.34	63.1	-	-
10	16.67	100	-	-
16	0.01592	0.1	1223000	41.35
16	0.02531	0.1585	1254000	40.8
16	0.03995	0.2512	2622000	37.16
16	0.06334	0.3981	2611000	-
16	0.1004	0.631	2508000	-

16	0.1592	1	-	-	16	0.1592	1	-	-
16	0.2532	1.585	-	-	16	0.2532	1.585	-	-
16	0.4	2.512	-	-	16	0.4	2.512	-	-
16	0.6342	3.981	-	-	16	0.6342	3.981	-	-
16	1.007	6.31	-	-	16	1.007	6.31	-	-
16	1.596	10	-	-	16	1.596	10	-	-
16	2.542	15.85	-	-	16	2.542	15.85	-	-
16	4	25.12	-	-	16	4	25.12	-	-
16	6.383	39.81	-	-	16	6.383	39.81	-	-
16	10.34	63.1	-	-	16	10.34	63.1	-	-
16	16.67	100	-	-	16	16.67	100	-	-
22	0.01592	0.1	813800	46.33	22	0.01592	0.1	661900	38.41
22	0.02531	0.1585	988000	-	22	0.02531	0.1585	912900	-
22	0.03995	0.2512	1226000	-	22	0.03995	0.2512	1201000	-
22	0.06334	0.3981	-	-	22	0.06334	0.3981	1240000	-
22	0.1004	0.631	-	-	22	0.1004	0.631	1960000	-
22	0.1592	1	-	-	22	0.1592	1	2443000	-
22	0.2532	1.585	-	-	22	0.2532	1.585	-	-
22	0.4	2.512	-	-	22	0.4	2.512	-	-
22	0.6342	3.981	-	-	22	0.6342	3.981	-	-
22	1.007	6.31	-	-	22	1.007	6.31	-	-
22	1.596	10	-	-	22	1.596	10	-	-
22	2.542	15.85	-	-	22	2.542	15.85	-	-
22	4	25.12	-	-	22	4	25.12	-	-
22	6.383	39.81	-	-	22	6.383	39.81	-	-
22	10.34	63.1	-	-	22	10.34	63.1	-	-
22	16.67	100	-	-	22	16.67	100	-	-
28	0.01592	0.1	477600	42.01	28	0.01592	0.1	411000	48.01
28	0.02531	0.1585	588300	-	28	0.02531	0.1585	485000	45.85
28	0.03995	0.2512	739100	-	28	0.03995	0.2512	644100	-
28	0.06334	0.3981	869700	-	28	0.06334	0.3981	780700	-
28	0.1004	0.631	1100000	-	28	0.1004	0.631	1049000	-
28	0.1592	1	-	-	28	0.1592	1	-	-
28	0.2532	1.585	-	-	28	0.2532	1.585	-	-
28	0.4	2.512	-	-	28	0.4	2.512	-	-
28	0.6342	3.981	-	-	28	0.6342	3.981	-	-
28	1.007	6.31	-	-	28	1.007	6.31	-	-
28	1.596	10	-	-	28	1.596	10	-	-
28	2.542	15.85	-	-	28	2.542	15.85	-	-
28	4	25.12	-	-	28	4	25.12	-	-
28	6.383	39.81	-	-	28	6.383	39.81	-	-
28	10.34	63.1	-	-	28	10.34	63.1	-	-
28	16.67	100	-	-	28	16.67	100	-	-
34	0.01592	0.1	279600	44.84	34	0.01592	0.1	191000	50.19
34	0.02531	0.1585	304300	44.71	34	0.02531	0.1585	233100	49.44
34	0.03995	0.2512	437000	42.6	34	0.03995	0.2512	354800	47.11
34	0.06334	0.3981	558900	39.37	34	0.06334	0.3981	418100	45.47
34	0.1004	0.631	665000	-	34	0.1004	0.631	538500	42.72
34	0.1592	1	-	-	34	0.1592	1	619600	-
34	0.2532	1.585	-	-	34	0.2532	1.585	820300	-
34	0.4	2.512	-	-	34	0.4	2.512	1005000	-
34	0.6342	3.981	-	-	34	0.6342	3.981	1552000	-
34	1.007	6.31	-	-	34	1.007	6.31	-	-
34	1.596	10	-	-	34	1.596	10	-	-
34	2.542	15.85	-	-	34	2.542	15.85	-	-
34	4	25.12	-	-	34	4	25.12	-	-
34	6.383	39.81	-	-	34	6.383	39.81	-	-

34	10.34	63.1	-	-	34	10.34	63.1	-	-
34	16.67	100	-	-	34	16.67	100	-	-
40	0.01592	0.1	145100	49.94	40	0.01592	0.1	107200	59.63
40	0.02531	0.1585	169300	48.36	40	0.02531	0.1585	134200	52.63
40	0.03995	0.2512	213200	48.19	40	0.03995	0.2512	174200	-
40	0.06334	0.3981	277000	47.56	40	0.06334	0.3981	225200	-
40	0.1004	0.631	348700	44.14	40	0.1004	0.631	291700	-
40	0.1592	1	385000	41.65	40	0.1592	1	397100	-
40	0.2532	1.585	544000	-	40	0.2532	1.585	588000	-
40	0.4	2.512	655300	-	40	0.4	2.512	595900	-
40	0.6342	3.981	925400	-	40	0.6342	3.981	726200	-
40	1.007	6.31	-	-	40	1.007	6.31	974300	-
40	1.596	10	-	-	40	1.596	10	1324000	-
40	2.542	15.85	-	-	40	2.542	15.85	1506000	-
40	4	25.12	-	-	40	4	25.12	-	-
40	6.383	39.81	-	-	40	6.383	39.81	-	-
40	10.34	63.1	-	-	40	10.34	63.1	-	-
40	16.67	100	-	-	40	16.67	100	-	-
46	0.01592	0.1	63810	57.65	46	0.01592	0.1	53030	62.38
46	0.02531	0.1585	83580	52.69	46	0.02531	0.1585	68350	56.46
46	0.03995	0.2512	107700	50.95	46	0.03995	0.2512	90670	56.07
46	0.06334	0.3981	139700	-	46	0.06334	0.3981	119600	54.3
46	0.1004	0.631	180300	-	46	0.1004	0.631	158400	51.94
46	0.1592	1	229600	-	46	0.1592	1	204600	50.62
46	0.2532	1.585	286700	-	46	0.2532	1.585	249900	-
46	0.4	2.512	411600	-	46	0.4	2.512	327100	-
46	0.6342	3.981	508200	-	46	0.6342	3.981	486200	-
46	1.007	6.31	623100	-	46	1.007	6.31	472400	-
46	1.596	10	807800	-	46	1.596	10	689900	-
46	2.542	15.85	-	-	46	2.542	15.85	873300	-
46	4	25.12	-	-	46	4	25.12	1210000	-
46	6.383	39.81	-	-	46	6.383	39.81	1446000	-
46	10.34	63.1	-	-	46	10.34	63.1	1705000	-
46	16.67	100	-	-	46	16.67	100	-	-
52	0.01592	0.1	9280	61.23	52	0.01592	0.1	5352	71.96
52	0.02531	0.1585	10950	60.43	52	0.02531	0.1585	12930	-
52	0.03995	0.2512	12340	-	52	0.03995	0.2512	10090	-
52	0.06334	0.3981	-	-	52	0.06334	0.3981	-	-
52	0.1004	0.631	-	-	52	0.1004	0.631	-	-
52	0.1592	1	-	-	52	0.1592	1	-	-
52	0.2532	1.585	-	-	52	0.2532	1.585	-	-
52	0.4	2.512	-	-	52	0.4	2.512	-	-
52	0.6342	3.981	-	-	52	0.6342	3.981	-	-
52	1.007	6.31	-	-	52	1.007	6.31	-	-
52	1.596	10	-	-	52	1.596	10	-	-
52	2.542	15.85	-	-	52	2.542	15.85	-	-
52	4	25.12	-	-	52	4	25.12	-	-
52	6.383	39.81	-	-	52	6.383	39.81	-	-
52	10.34	63.1	-	-	52	10.34	63.1	-	-
52	16.67	100	-	-	52	16.67	100	-	-
58	0.01592	0.1	3628	75.53	58	0.01592	0.1	2615	66.36
58	0.02531	0.1585	5419	63.8	58	0.02531	0.1585	3496	63.83
58	0.03995	0.2512	7164	61.39	58	0.03995	0.2512	5019	-
58	0.06334	0.3981	9451	49.22	58	0.06334	0.3981	9196	-
58	0.1004	0.631	12660	-	58	0.1004	0.631	-	-
58	0.1592	1	-	-	58	0.1592	1	-	-
58	0.2532	1.585	-	-	58	0.2532	1.585	-	-

58	0.4	2.512	-	-	58	0.4	2.512	-	-
58	0.6342	3.981	-	-	58	0.6342	3.981	-	-
58	1.007	6.31	-	-	58	1.007	6.31	-	-
58	1.596	10	-	-	58	1.596	10	-	-
58	2.542	15.85	-	-	58	2.542	15.85	-	-
58	4	25.12	-	-	58	4	25.12	-	-
58	6.383	39.81	-	-	58	6.383	39.81	-	-
58	10.34	63.1	-	-	58	10.34	63.1	-	-
58	16.67	100	-	-	58	16.67	100	-	-
64	0.01592	0.1	1555	75.38	64	0.01592	0.1	963.7	77.2
64	0.02531	0.1585	2063	69.29	64	0.02531	0.1585	1432	74.99
64	0.03995	0.2512	3443	-	64	0.03995	0.2512	1991	72.05
64	0.06334	0.3981	5483	-	64	0.06334	0.3981	2692	-
64	0.1004	0.631	-	-	64	0.1004	0.631	4326	-
64	0.1592	1	-	-	64	0.1592	1	7739	-
64	0.2532	1.585	-	-	64	0.2532	1.585	8267	-
64	0.4	2.512	-	-	64	0.4	2.512	-	-
64	0.6342	3.981	-	-	64	0.6342	3.981	-	-
64	1.007	6.31	-	-	64	1.007	6.31	-	-
64	1.596	10	-	-	64	1.596	10	-	-
64	2.542	15.85	-	-	64	2.542	15.85	-	-
64	4	25.12	-	-	64	4	25.12	-	-
64	6.383	39.81	-	-	64	6.383	39.81	-	-
64	10.34	63.1	-	-	64	10.34	63.1	-	-
64	16.67	100	-	-	64	16.67	100	-	-
70	0.01592	0.1	645.8	80.01	70	0.01592	0.1	368.7	81.39
70	0.02531	0.1585	928.9	73.02	70	0.02531	0.1585	558.9	79.4
70	0.03995	0.2512	1375	-	70	0.03995	0.2512	831	76.98
70	0.06334	0.3981	2060	-	70	0.06334	0.3981	1176	75.27
70	0.1004	0.631	2774	-	70	0.1004	0.631	1642	75.09
70	0.1592	1	3777	-	70	0.1592	1	2446	70.02
70	0.2532	1.585	-	-	70	0.2532	1.585	3684	67.13
70	0.4	2.512	-	-	70	0.4	2.512	5978	63.19
70	0.6342	3.981	-	-	70	0.6342	3.981	10690	-
70	1.007	6.31	-	-	70	1.007	6.31	-	-
70	1.596	10	-	-	70	1.596	10	-	-
70	2.542	15.85	-	-	70	2.542	15.85	-	-
70	4	25.12	-	-	70	4	25.12	-	-
70	6.383	39.81	-	-	70	6.383	39.81	-	-
70	10.34	63.1	-	-	70	10.34	63.1	-	-
70	16.67	100	-	-	70	16.67	100	-	-
76	0.01592	0.1	268.9	82.6	76	0.01592	0.1	146	83.69
76	0.02531	0.1585	402.6	79.45	76	0.02531	0.1585	224.1	82.39
76	0.03995	0.2512	598.4	79.27	76	0.03995	0.2512	334.8	80.75
76	0.06334	0.3981	921.6	77.67	76	0.06334	0.3981	515.9	78.4
76	0.1004	0.631	1379	74.73	76	0.1004	0.631	748.5	78.38
76	0.1592	1	1865	73.34	76	0.1592	1	1132	77.83
76	0.2532	1.585	2523	62.95	76	0.2532	1.585	1664	-
76	0.4	2.512	3592	-	76	0.4	2.512	2353	-
76	0.6342	3.981	-	-	76	0.6342	3.981	3864	-
76	1.007	6.31	-	-	76	1.007	6.31	4726	-
76	1.596	10	-	-	76	1.596	10	-	-
76	2.542	15.85	-	-	76	2.542	15.85	-	-
76	4	25.12	-	-	76	4	25.12	-	-
76	6.383	39.81	-	-	76	6.383	39.81	-	-
76	10.34	63.1	-	-	76	10.34	63.1	-	-
76	16.67	100	-	-	76	16.67	100	-	-

Tabla 31. Barridos de Frecuencia del Asfalto Envejecido por PAV para el Asfalto de Altamira.

Temp. °C	Frq (Hz)	ω (rad/seg)	G* (Pa)	δ
10	0.015915494	0.1	4247306.205	37.56
10	0.034281975	0.2154	5882619.995	35.7
10	0.073879725	0.4642	7986798.107	34.12
10	0.159154943	1	10659834.99	32.71
10	0.342819747	2.154	14030798.27	31.45
10	0.738797246	4.642	18304495.73	30.32
10	1.591549431	10	23644223.4	29.3
10	3.428197474	21.54	30121686.54	28.86
10	7.387972458	46.42	38466611.5	27.91
10	15.91549431	100	48363279.46	27.03
20	0.015915494	0.1	1109343.919	43.79
20	0.034281975	0.2154	1599422.708	42.08
20	0.073879725	0.4642	2269636.535	40.54
20	0.159154943	1	3179497.602	39.14
20	0.342819747	2.154	4402750.163	37.78
20	0.738797246	4.642	6030905.073	36.53
20	1.591549431	10	8146655.756	35.4
20	3.428197474	21.54	10888367.6	34.35
20	7.387972458	46.42	14451287.45	33.35
20	15.91549431	100	18914124.35	32.44
30	0.015915494	0.1	250415.2152	49.59
30	0.034281975	0.2154	378822.663	47.79
30	0.073879725	0.4642	564811.65	46.17
30	0.159154943	1	828880.0275	44.73
30	0.342819747	2.154	1205670.635	43.39
30	0.738797246	4.642	1728029.224	42.28
30	1.591549431	10	2449825.504	41.21
30	3.428197474	21.54	3442990.561	40.19
30	7.387972458	46.42	4715371.671	39.34
30	15.91549431	100	6450185.269	38.42
40	0.015915494	0.1	54327.3375	56.31
40	0.034281975	0.2154	86692.14036	53.91
40	0.073879725	0.4642	135610.4159	51.95
40	0.159154943	1	208418.6412	50.28
40	0.342819747	2.154	316656.1858	48.88
40	0.738797246	4.642	473393.5889	47.76
40	1.591549431	10	704242.2382	46.72
40	3.428197474	21.54	1024439.535	45.89
40	7.387972458	46.42	1471493.459	45.13
40	15.91549431	100	2106633.57	44.29
50	0.015915494	0.1	10419.87164	64.57
50	0.034281975	0.2154	17873.00993	61.32
50	0.073879725	0.4642	29757.73009	58.57
50	0.159154943	1	48214.55071	56.28
50	0.342819747	2.154	76860.82227	54.33
50	0.738797246	4.642	120349.5663	52.84
50	1.591549431	10	185571.2262	51.79
50	3.428197474	21.54	282976.3594	51
50	7.387972458	46.42	428926.3457	50.4
50	15.91549431	100	645118.6015	49.97
60	0.015915494	0.1	2507.762088	72.45
60	0.034281975	0.2154	4609.594342	68.81
60	0.073879725	0.4642	8189.169677	65.47
60	0.159154943	1	14045.67154	62.52

60	0.342819747	2.154	23532.3097	59.9
60	0.738797246	4.642	38501.40387	57.83
60	1.591549431	10	61802.05984	56.18
60	3.428197474	21.54	97750.76726	54.98
60	7.387972458	46.42	152112.2493	54.14
60	15.91549431	100	235245.9989	53.54
70	0.015915494	0.1	568.1238685	79.83
70	0.034281975	0.2154	1118.217886	76.64
70	0.073879725	0.4642	2121.125777	73.33
70	0.159154943	1	3910.053708	69.98
70	0.342819747	2.154	6996.927397	66.84
70	0.738797246	4.642	12110.3635	64.06
70	1.591549431	10	20471.76876	61.73
70	3.428197474	21.54	33824.96859	59.89
70	7.387972458	46.42	54760.38075	58.48
70	15.91549431	100	87526.89015	57.45
80	0.015915494	0.1	133.6700415	85.19
80	0.034281975	0.2154	275.7916786	82.77
80	0.073879725	0.4642	556.1914261	80.04
80	0.159154943	1	1090.71146	77.06
80	0.342819747	2.154	2080.24794	73.94
80	0.738797246	4.642	3844.34962	70.87
80	1.591549431	10	6922.770327	67.99
80	3.428197474	21.54	12106.24863	65.44
80	7.387972458	46.42	20688.62008	63.28
80	15.91549431	100	34584.39099	61.52