



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Comportamiento del residuo de café como biomaterial para modificar
asfalto

Trabajo escrito

Opción de titulación:
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Presenta

Ing. Adrián Campos González

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-dirigido por:

Dra. Genoveva Hernández Padrón

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Dra. Genoveva Hernández Padrón
Secretario

Dr. Eduardo Rojas González
Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente

Dr. Pedro Limón Covarrubias
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Julio 2020
México

RESUMEN

El aumento de la conciencia ambiental, alienta la investigación para explorar recursos novedosos para la producción de asfaltos y una generación alternativa de modificadores. Estas iniciativas son impulsadas por la producción de bioasfaltos, y el alivio de la aparición de vertederos de materiales contaminantes. El objetivo de este estudio es determinar nuevas propiedades de un asfalto tipo EKBE 64-22 modificado con diferente porcentaje de biomasa de café, producido en México y su influencia en la característica química, morfológica, reológicas y mecánicas del ligante. Con el fin de reducir con la adición la cinética de oxidación a corto plazo que se produce en el ligante durante el traslado del material de la planta hasta su tendido, el modificador se incorpora a la mezcla en tres porcentajes 1%, 2%, 3% para cuatro grados de trituración del material en un molino eléctrico, con tiempos de molido 1min, 5min, 10min y 20min. Las comparativas fueron entre el asfalto base y las modificaciones antes y después de envejecidas en el horno de película delgada rotacional (RTFO) mediante técnicas de Espectroscopia Infrarroja para detectar la presencia del material en las mezclas, Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM, según sus siglas en inglés) para analizar los cambios en su morfología; ensayos de penetración y esfuerzo-deformación en la búsqueda de cuantificar sus resistencia mecánica y ensayos de Reómetro de Corte Dinámico y el viscosímetro rotacional Brookfield para medir sus propiedades reológicas. Los resultados de espectroscopia demostraron que el asfalto modificado mantiene los grupos funcionales y se detecta al material modificador a pequeña escala debido a sus bajos porcentajes de incorporación. Los resultados en el TEM muestran la modificación en la morfología y estructura de la mezcla detectando la presencia de las partículas del modificador y el tamaño de partícula que puede conformar un conglomerado más homogéneo. Con respecto a las pruebas mecánicas de

penetración y esfuerzo deformación se observa una mejora de sus propiedades en ambos casos con la adición. Las pruebas reológicas obtenidas del ensayo en el Reómetro de Corte Dinámico y el viscosímetro rotacional Brookfield muestran un control de la viscosidad del ligante retardando el envejecimiento.

(**Palabras clave:** café, reciclaje, asfalto, oxidación.)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

SUMMARY

Increased environmental awareness encourages research to explore novel resources for asphalt production and an alternative generation of modifiers. These initiatives are driven by the production of bioasphalts, and the relief of the appearance of landfills of polluting materials. The objective of this study is to determine new properties of a modified EKBE 64-22 type asphalt with a different percentage of coffee biomass, produced in Mexico and its influence on the chemical, morphological, rheological and mechanical characteristics of the binder. In order to reduce with the addition the short-term oxidation kinetics that occurs in the binder during the transfer of the material from the plant to its laying, the modifier is incorporated into the mixture in three percentages 1%, 2%, 3 % for four degrees of crushing the material in an electric mill, with grinding times of 1min, 5min, 10min and 20min. The comparisons were between the base asphalt and the modifications before and after aging in the rotational thin film oven (RTFO) using Infrared Spectroscopy techniques to detect the presence of the material in the mixtures, Transmission Electron Microscopy (TEM). in English) to analyze changes in its morphology; penetration and stress-deformation tests in search of quantifying their mechanical resistance and tests of Dynamic Shear Rheometer and Brookfield rotational viscometer to measure their rheological properties. The spectroscopy results demonstrated that the modified asphalt maintains functional groups and the modifying material is detected on a small scale due to its low incorporation rates. The results in the TEM show the modification in the morphology and structure of the mixture by detecting the presence of the modifier particles and the particle size that a more homogeneous conglomerate can make up. Regarding the mechanical tests of penetration and deformation stress, an improvement of its properties is observed in both cases with the addition. The rheological tests obtained from the test on the

Dynamic Shear Rheometer and the Brookfield rotational viscometer show a control of the viscosity of the binder delaying aging.

(Keywords: coffee, recycling, asphalt, oxidation)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

DEDICATORIAS

A mi familia, mi esposa y a mis profesores, por todo su apoyo incondicional, a Cuba por formarme como ingeniero, a México por materializar mis sueños profesionales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para la realización de esta maestría.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por abrirme sus puertas y permitirme formar parte de ella.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su apoyo desde los primeros momentos cuando formarme en México era solo un sueño, por brindarme cada minuto de su tiempo de forma incondicional durante el proceso de admisión y luego en la investigación.

A la Dra. Genoveva Hernández Padrón por tanta amabilidad brindada, por su paciencia en la capacitación, su incentivo constante hacia mi persona y su apoyo durante cada ensayo realizado.

Al Dr. Omar Chávez Alegría por su capacitación a distancia durante el curso propedéutico, sus excelentes clases en las asignaturas impartidas en la maestría y su apoyo tanto en la investigación como en la formación ingenieril.

Al Dr. Eduardo Rojas González por poner a mi disposición todos sus conocimientos para la orientación en el trabajo y el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Pedro Limón Covarrubias por recibirme en la estancia en Guadalajara y su apoyo en la realización de la prueba del Reómetro de Corte Dinámico (Dynamic Shear Rheometer, DSR).

A la Maestra Wendy Alejandra Casanova Zavala por poner a mi disposición toda su ayuda y experiencia en investigaciones de esta índole.

A la Bioquímica Ma. Lourdes Palma por su apoyo en la pruebas de Microscopia Electrónica de Transmisión.

Al Maestro Gerardo A. Fonseca Hernández por su apoyo en la realización de las pruebas mecánicas.

Al Ing. Martín Rodríguez por su apoyo en la obtención del ligante asfáltico para la investigación.

A los que me dieron la fuerza, claridad y tranquilidad para seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
SUMMARY.....	IV
DEDICATORIAS.....	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.3 HIPÓTESIS:	10
1.4 OBJETIVO GENERAL	10
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
2.1 ASFALTO MODIFICADO.	16
2.2 TIPOS DE ASFALTOS EXISTENTES	18
2.3 ASFALTO Y SUS PROPIEDADES	20
2.4 EL CAFÉ Y SUS PROPIEDADES	23
2.5 PRINCIPALES MODIFICADORES UTILIZADOS EN EL ASFALTO	30
3. METODOLOGÍA	33
3.1 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS DE ASFALTO-CAFÉ	34
3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA.	35
3.2.1 <i>Espectroscopia Infrarroja</i>	36
3.2.2 <i>Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM, por sus siglas en inglés).</i>	38
3.2.3 <i>Ensayo de Horno Giratorio de Película Delgada (RTFO, por sus siglas en inglés).</i>	41

3.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA.....	43
3.3.1	<i>Penetración (ASTM D5)</i>	43
3.3.2	<i>Prueba Esfuerzo-Deformación (ASTM D638-10)</i>	45
3.4	CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA	47
3.4.1	<i>Prueba de Viscosidad Rotacional (ASTM D4402-12)</i>	47
3.4.2	<i>Reómetro de Corte Dinámico (ASTM D7175-08)</i>	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	53
4.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE LAS MEZCLAS.....	55
4.2.1	<i>Espectroscopia Infrarroja</i>	55
4.2.2	<i>Microscopia Electrónica de Transmisión</i>	61
4.3	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	66
4.3.1	<i>Penetración</i>	66
4.3.2	<i>Prueba Esfuerzo-Deformación</i>	71
4.4	REOLOGÍA	73
4.4.1	<i>Viscosidad Rotacional Brookfield</i>	73
4.4.2	<i>Reómetro de corte dinámico (DSR)</i>	89
4.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	91
5.	CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES.....	96
6.	REFERENCIAS	99
7.	ANEXOS	105
7.1	RESULTADOS DEL LABORATORIO REFERENTES AL ENSAYO DE PENETRACIÓN	105
7.2	PROCESAMIENTO DE DATOS FACILITADO POR EL LABORATORIO ANTE EL ENSAYO DE PENETRACIÓN.	106
7.3	GRÁFICAS DE ESFUERZO – DEFORMACIÓN DE CADA MATERIAL ASFÁLTICO SEGÚN SU PORCIENTO DE INCORPORACIÓN Y TIEMPO DE MOLIDO DEL BIOMATERIAL.	107
7.3.1	<i>Asfalto Natural</i>	107

7.3.2	Asfalto Modificado 1% - 1min	107
7.3.3	Asfalto Modificado 1% - 5min	108
7.3.4	Asfalto Modificado 1% - 10min	108
7.3.5	Asfalto Modificado 1% - 20min	108
7.3.6	Asfalto Modificado 2% - 1min	109
7.3.7	Asfalto Modificado 2% - 5min	109
7.3.8	Asfalto Modificado 2% - 10min	109
7.3.9	Asfalto Modificado 2% - 20min	110
7.3.10	Asfalto Modificado 3% - 1min	110
7.3.11	Asfalto Modificado 3% - 5min	110
7.3.12	Asfalto Modificado 3% - 10min	111
7.3.13	Asfalto Modificado 3% - 20min	111
7.4	RESULTADOS DE PENETRACIÓN ASFALTO MODIFICADO ANTES DEL RTFO	112
7.5	RESULTADOS DE PENETRACIÓN ASFALTO MODIFICADO DESPUÉS DEL RTFO.	113
7.6	RESULTADOS COMPARATIVOS DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO MODIFICADO ANTES Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN RTFO.	114
7.7	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL ANTES DEL RTFO. 115	
7.8	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL ANTES DEL RTFO. 116	
7.9	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL ANTES DEL RTFO A 135°C.	116
7.10	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL DESPUÉS DEL RTFO. 117	
7.11	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL DESPUÉS DEL RTFO. 118	
7.12	VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD EN CP PARA 1MIN DE MOLIDO DEL MATERIAL DESPUÉS DEL RTFO A 135°C.	118

7.13	RESULTADOS COMPARATIVOS DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DEL ASFALTO MODIFICADO ANTES Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN RTFO.....	119
7.14	RESULTADOS COMPARATIVOS DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DEL ASFALTO MODIFICADO ANTES Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN RTFO PARA LA MUESTRA DE MEJOR RESULTADO.	120
7.15	RESULTADOS COMPARATIVOS DEL MÓDULO ELÁSTICO DEL ASFALTO MODIFICADO ANTES Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN RTFO.....	121
7.16	RESULTADOS COMPARATIVOS DEL MÓDULO DINÁMICO DEL ASFALTO MODIFICADO ANTES Y DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN RTFO.....	122

Dirección General de Bibliotecas UAG

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Residuos de café. (Fuente Elaboración propia, 2019)</i>	30
<i>Figura 2. Metodología Experimental realizada. (Fuente: Elaboración propia)</i>	33
<i>Figura 3. a. Equipo para el mezclado e incorporación del biomaterial café, b. Asfalto EKBE 64-22, c. Biomaterial, (Fuente elaboración propia, CFATA, UNAM)</i>	34
<i>Figura 4. Espectrómetro Thermo Scientific Nicolet 6700 (LACAM. CFATA, UNAM Campus Juriquilla)</i>	38
<i>Figura 5. a. Preparación de las muestras para TEM, b. Microscopio Electrónico de Trasmisión.</i>	40
<i>Figura 6. a. Horno Giratorio de Película Delgada, b. Tubos que portan el material a ensayar</i>	42
<i>Figura 7. a.-b. Equipo para la realización del ensayo, c. Moldes para conformar muestras, d. Muestras elaboradas</i>	45
<i>Figura 8. a. Equipo de tracción, b-c Moldes de “hueso de perro” del LACAM del CAFATA, UNAM Campus Juriquilla.</i>	46
<i>Figura 9. a) y b) Viscosímetro Rotacional Brookfield, c- Contenedor del Viscosímetro</i>	49
<i>Figura 10. Reómetro de Corte Dinámico</i>	51
<i>Figura 11. Espectro del asfalto base o natural sin modificar (Fuente elaboración propia)</i>	56
<i>Figura 12. Espectro del biomaterial (café) para sus diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)</i>	57
<i>Figura 13. Espectro IR de absorbanca del biomaterial para mezclas con concentración 1% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)</i>	58
<i>Figura 14. Espectro IR de absorbanca del biomaterial para mezclas con concentración 2% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)</i>	59
<i>Figura 15. Espectro IR de absorbanca del biomaterial para mezclas con concentración 3% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)</i>	60
<i>Figura 16. Espectro IR de absorbanca aplicación de escala de las muestras. (Fuente elaboración propia)</i>	61
<i>Figura 17. Observación del Asfalto Base sin modificar EKBE 64-22</i>	62
<i>Figura 18. Microfotografía del Asfalto modificado EKBE 64-22 con incorporaciones y tiempos de molido múltiples</i>	62
<i>Figura 19. Microfotografía del Asfalto modificado con una incorporación del 1% y un tiempo de molido de 5 min.</i>	63

<i>Figura 20. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 5 min.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 21. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 10 min.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 22. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 20min.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 23. Penetración de los asfaltos modificados con biomaterial (café). Valores promedios antes del RTFO.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24. Penetración de los asfaltos modificados con biomaterial (café). Valores promedios después del RTFO.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25. Resultados comparativos de penetración del asfalto modificado antes y después del envejecimientos en RTFO.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 26. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 27. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO a 135 °C</i>	<i>77</i>
<i>Figura 28. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 29. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO a 135 °C.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 30. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20min de molido del material antes del RTFO.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 31. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 20min de molido del material antes del RTFO a 135 °C.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 32. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5 min de molido del material después del RTFO.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 33. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 5min de molido del material después del RTFO a 135 °C.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 34. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 10 min de molido del material después del RTFO.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 35. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material después del RTFO a 135 °C.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 36. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20 min de molido del material después del RTFO.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 37. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20min de molido del material después del RTFO a 135 °C.</i>	<i>88</i>

<i>Figura 38. Valor para cada muestra de $G^*/\text{sen}\delta$ a una frecuencia de 10 rad/s y una temperatura de 64 °C antes del envejecimiento en RTFO.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 39. Valor para cada muestra de $G^*/\text{sen}\delta$ a una frecuencia de 10 rad/s y una temperatura de 64 °C después del envejecimiento en RTFO.</i>	<i>91</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Diseño experimental. (Fuente: Elaboración propia)</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 2. Módulos de elasticidad de las mezclas de asfalto modificado con biomaterial (café) antes del RTFO. (Fuente elaboración propia).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 3. Módulos de elasticidad de las mezclas de asfalto modificado con biomaterial (café) después del RTFO. (Fuente elaboración propia)</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 5. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 6. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 20min de molido del material antes del RTFO.</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 7. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5 min de molido del material después del RTFO.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 8. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10 min de molido del material después del RTFO.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 9. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20 min de molido del material después del RTFO.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 10. Resumen de parámetros del asfalto modificado con el biomaterial café antes del RTFO.</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 11. Resumen de parámetros del asfalto modificado con el biomaterial café después del RTFO.</i>	<i>95</i>

1. INTRODUCCIÓN

El asfalto o bitumen es una compleja mezcla de diferentes hidrocarburos, obtenido como un producto derivado del petróleo o en depósitos naturales, es de los materiales de ingeniería más antiguos utilizados por el hombre, las aplicaciones en el sector de la construcción datan de fechas prehistóricas, cerca del 5.000 AC (González, 2010). Aún en el presente, debido a sus buenas propiedades adhesivas e hidrofóbicas es ampliamente utilizado en diferentes aplicaciones, concentradas principalmente en la fabricación de vías. También en una menor proporción es destinado para funciones como: impermeabilización, adhesivos, control de erosión, en la industria automotriz y eléctrica (Yusoff, 2010). Es el material más empleado en la construcción de carreteras a nivel mundial, ya que el 85% de la producción de este producto es utilizado para pavimentación (Cremades, 2010).

Estas infraestructuras se construyen para satisfacer una demanda creciente, que involucra tanto mayores volúmenes de tráfico como mayores cargas de los vehículos, lo cual repercute en el tiempo de servicio de las carreteras, así como en los presupuestos asignados para conservación de los caminos, la seguridad vial y condiciones de servicio de la infraestructura (Troncoso, 2011).

La historia de la modificación de asfalto no es tan reciente como se podría pensar, de acuerdo al artículo de (King, 1843) fueron concedidas patentes para modificar asfalto con polímeros naturales y sintéticos. Proyectos piloto se pusieron en marcha en Europa, a principios de los años treinta. En Norteamérica, los modificadores fueron introducidos en los años cincuenta y encontraron un mercado pequeño pero constante. Al pasar de los años el uso de los aditivos aumentó, especialmente después de la introducción y desarrollo de Autopistas (Strategic Highway Research Program, SHRP, 1995), a partir del cual se desarrollaron especificaciones de ligantes

asfálticos Superpave Performance Graded (PG) a principios de los años noventa en los EE.UU.

Los asfaltos modificados elevan la vida útil de un pavimento, algunos autores consideran que puede ser de dos a tres veces (según el caso a aplicar), con un costo menor de hasta un 25 % sobre el costo la mezcla asfáltica. Está plenamente demostrado que los asfaltos convencionales poseen propiedades muy satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito, la magnitud de las cargas en algunos casos hasta de 44 toneladas, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes (Zhu *et al.*, 2014). A modo de ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado, ahuellamientos, especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura y tránsito lento en intersecciones.

El día a día de las últimas décadas ha presentado múltiples factores que hacen que el asfalto por sí sólo no sea apto para ser utilizado. Razones que han sido atribuidas al incremento de los niveles de tráfico, la producción de vehículos cada vez más grandes y pesados, el incremento en las presiones de los neumáticos, la innovación de nuevos productos asfálticos, y la permanente obtención de asfaltos provenientes de nuevas fuentes, que en algunos casos, por su naturaleza no poseen propiedades aptas para resistir por si solos sollicitaciones con ciertos requerimientos, por ejemplo: temperaturas ambientales extremas o cargas de trabajo excesivas. Suma de acontecimientos que originaron investigaciones sobre nuevas tecnologías que permitiesen el desarrollo de asfaltos con mejores características, en general que fueran más resistentes y duraderos que el asfalto por sí solo (Zou, 2010). Uno de

los efectos de las investigaciones encaminadas a optimizar las propiedades del asfalto, fue que estimuló la búsqueda de materiales con características idóneas para su modificación en estado natural, creando un nuevo panorama donde sobresalieron los polímeros y biomateriales como una interesante opción.

Yildirim (2007) expone que estos nuevos asfaltos con la incorporación de polímeros y biomateriales son más resistentes a la fatiga y a los cambios de temperatura, además de presentar un aumento de la recuperación elástica y la viscosidad son comúnmente empleados en lugares como intersecciones muy transitadas, aeropuertos y pistas de carrera.

Por lo anterior, Maxil y Salinas (2006) sostienen que la finalidad de modificar los asfaltos, ha sido la de contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas y de la lucha constante contra la oxidación a corto, mediano y largo plazo de las mezclas, con el objeto de disminuir tanto el ahuellamiento de las capas de rodamiento, como disminuir las fisuras por bajas temperaturas y por fatiga, aumentando así la tenacidad en las mezclas asfálticas.

Las modificaciones al asfalto convencional no sólo han ido encaminadas a la búsqueda de un material que brinde mejores prestaciones y sea capaz de activarlo nuevamente una vez que cumpla con su vida de servicio, sino también que los aditivos utilizados sean productos de desechos orgánicos que se encuentran en exceso en el planeta por su alto consumo, alterando varios índices medioambientales producto de la contaminación que ofrecen en su proceso de descomposición y dando origen al término bioasfaltos. (Jalkh, 2016).

Algunas de las investigaciones más importantes en el tema de bioasfaltos pueden encontrarse relacionada con materiales como:

Aceite crudo de palma, utilizado como aditivo reductor de viscosidad del asfalto. Técnica aplicada por primera vez en Colombia siendo este país el primer productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial. La conformación de la mezcla se obtuvo con 54.1% de gruesos, 41.7% de finos y 4.2% de ligante utilizando cal hidratada, y se mezcló con asfalto de penetración 60-70, modificado con crudo de palma al 1%. El diseño se realizó por el método Marshall, la temperatura de producción de la mezcla se redujo, así como la viscosidad del asfalto y se mejoró el desempeño de la mezcla asfáltica tibia comparada con la mezcla asfáltica en caliente. (Conrado, 2011).

En Francia fueron investigadas las mezclas tibias mediante la modificación del asfalto por medio de la adición de biomaterial, *aceites de desechos en cocinas*. Su estudio se fundamentó en la variación del porcentaje de biomaterial (1 y 4%) en el asfalto y el ensayo de viscosidad rotacional a temperaturas de 100, 135 y 160°C. A partir de los resultados de viscosidad, el autor estableció que el porcentaje óptimo de biomaterial está entre 1 y 2%, lo que ocasiona una disminución de la temperatura de fabricación de la mezcla entre 5 y 9°C. Paralelamente estudió la variación de las propiedades reológicas del asfalto modificado mediante envejecimiento por acción del aire y temperatura, estableciendo a partir de los ensayos de penetración, ductilidad, índice de penetración y punto de ablandamiento; que el porcentaje óptimo de biomaterial es del 2%. Estos resultados plantearon la viabilidad de su uso y la reducción de las temperaturas de compactación con propiedades similares a las mezclas convencionales, así como en el aumento de la respuesta ante el período de oxidación de la mezcla. (Herrera, 2016)

Cultivo de microalgas con el fin de aumentar la población de lípidos y poder extraer aceite de él, para brindarle aplicación en la ingeniería civil. Investigadores de diversos laboratorios franceses del Centro Nacional de Investigación Científica

(CNRs), en colaboración con la empresa AlgoSource Technologies, han demostrado que pueden servir también para fabricar asfaltos más ecológicos o bio-asfaltos. Aunque la composición química del bio-asfalto es completamente diferente al derivado del petróleo, ambos tienen similitudes, como su color negro y sus propiedades. Puede dar lugar a efectos variables sobre las diferentes propiedades del aglutinante de asfalto. Además, las pruebas de penetración en el bio-asfalto aumentan considerablemente con el incremento del contenido de aceite a una temperatura dada, llegando a alcanzar valores que exceden en un 15% a la penetración del asfalto base, lo que indica un efecto suavizante del bio-asfalto. También, exponen que el punto de reblandecimiento disminuye ligeramente al aumentar el contenido de bio-material. (Louvet, 2015)

Las modificaciones de los aglomerantes asfálticos con residuos de café son muy jóvenes en la investigación, puesto que inició este material como aditivos en otros materiales empleados en la construcción que brindaron excelentes resultados.

Se ha propuesto la paja de café como material de aislamiento acústico y absorción para la industria de la construcción. Se produjeron y probaron diferentes espesores de muestra por medio de un tubo de impedancia, de acuerdo con ISO 10534-2, que muestra un buen comportamiento a frecuencias medias altas. Las tendencias del coeficiente de absorción de sonido se obtuvieron variando el grosor, de 1 cm a 4 cm con paso y mostró un buen comportamiento en el medio a altas frecuencias. El aumento de espesor determina una mayor absorción a bajas frecuencias y un desplazamiento del valor máximo hacia las frecuencias más bajas ($\alpha = 0,78$ a 4000 Hz para la muestra de 4 cm). Los diferentes métodos de producción se analizaron comparando la absorción. Este estudio llevó a la conclusión de que la paja de café podría ser un excelente material de aislamiento para la industria de la construcción, especialmente en paneles prensados en frío. (Ricciardi, 2017).

La exploración del efecto ante períodos de oxidación más largos sobre las propiedades fisicoquímicas de los aceites extraídos del subproducto del café, incorporados a ligantes asfálticos oxidados han dado inicio en países como el Líbano demostrando que, en consecuencia, se encontraron tiempos de oxidación más largos que aumentan la visco-elasticidad de los asfaltos. Además de controlar el proceso de oxidación y la duración de este, se puede utilizar para personalizar las viscosidades dependiendo de las modificaciones deseadas, basadas en las características del aglutinante. (Jalkh, 2017)

1.1 Justificación

El aumento de la conciencia ambiental, de los costos de combustible y las demandas de energía alienta la investigación para explorar recursos novedosos y sostenibles para la producción de asfaltos, así como una generación alternativa de modificadores; especialmente si reciclan desechos y / o material existente. Estas iniciativas son impulsadas por la producción de asfaltos sostenibles en un intento de reducir las emisiones de carbono, el consumo de recursos naturales y el alivio de la aparición de vertederos de dichos materiales, mientras que aumenta la rentabilidad de la producción (Chehab, 2006).

Una de las tantas modificaciones con biomateriales al asfalto se realiza con el subproducto del café luego que lo procesamos para su consumo, la investigación con la biomasa y el efecto ante la oxidación en sus propiedades físico-químicas y reológicas una vez adicionado al asfalto convencional oxidado, con el fin de evaluar posibles usos al minimizar la oxidación del aglutinante, es un tema reciente, novedoso y ha brindado excelentes resultados que incentivan a la comunidad científica a seguir profundizando en él. Los últimos registros señalan que el café

puede ser capaz de modificar la viscosidad utilizado como aditivo, resultados que datan de una investigación que inició en el año 2015. (Jalkh, 2016).

Actualmente, se producen ligantes alternativos de biomásas que se consideran como una de las mayores fuentes de ahorros de energía en todo el mundo. Por otra parte, la utilización de residuos de biomasa como el café molido podría agregar una nueva serie de aplicaciones para subproductos peligrosos de la industria alimentaria ya que se ha informado que la descomposición de este material requiere una gran demanda de oxígeno, mientras que libera materia orgánica junto con otros contaminantes como la cafeína, taninos y polifenoles al medio ambiente, sumado que la Organización Internacional del Café declara la comercialización de 8.8 toneladas de café anualmente dispuestas al consumo de la población, terminado este subproducto en vertederos urbanos, una vez que es procesado en los hogares (Daniel, 2019).

Los objetivos de este estudio son investigar el comportamiento de la oxidación ante las propiedades fisicoquímicas y reológicas del asfalto modificado con subproducto del café, con el fin de reducir, con la adición de este biomaterial la velocidad de oxidación, y evaluar su posible uso como modificador. Se espera que la adición aumente su viscosidad y actúe ante la oxidación de la mezcla.

1.2 Descripción del Problema

El 90% de las carreteras de México son construidas con materiales asfálticos, por lo cual se busca mejorar estos materiales de acuerdo a las exigencias de servicio que ofrecen las vialidades, esta búsqueda de mejorar los materiales es lo que llevó al desarrollo de los asfaltos modificados. Se han dado casos en los que el funcionamiento de carreteras donde se utilizaron asfaltos modificados en su construcción, no ha sido el esperado, pues presentan agrietamientos y

ahuellamientos, siendo contradictorio con los resultados que los asfaltos modificados debieran brindar (Rubio, 2011).

Está declarado que algunas de estas patologías presentadas en las carpetas son producto del endurecimiento de la mezcla, también conocido como fenómeno de oxidación, los factores que lo propician son muy variables entre ellos: La operación en las plantas mezcladoras, sobre calentamiento de tanques de almacenamiento, etc. Este es un fenómeno complejo que puede mostrarse por fisuras en la carpeta asfáltica, separación del ligante y el agregado, y migración del asfalto. Además, el endurecimiento incrementa la rigidez de la mezcla, vinculándose con las deformaciones plásticas, y posibles agrietamientos por fatiga que pueden afectar al pavimento flexible, al relacionarse directamente con la tensión-deformación a la cual está sometido (Jalkh, 2016).

El envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfaltos creando moléculas más grades y polares (Husain & Anderson, 1994). Tales cambios moleculares alteran las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas, tales como el módulo (G^*) y el ángulo de fase (δ). Para evaluar el efecto del envejecimiento es necesario medir las propiedades visco-elásticas de muestras envejecidas y muestras originales. El efecto general del envejecimiento es un incremento del módulo y una disminución del ángulo de fase.

El asfalto presenta dos etapas de envejecimiento, una es durante el mezclado, colocación y compactación de la mezcla asfáltica y la otra es a largo plazo estando a la intemperie. El más agresivo es el envejecimiento que afecta al ligante durante el transporte y la puesta en obra lo que se describe como el envejecimiento a corto plazo (descrito en inglés como “short-term ageing” y la prueba que se utiliza para medirlo es la de la película delgada rotativa RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)

(Zhu *et al.*, 2014), esta técnica de envejecimiento fue desarrollada por el Departamento de Carreteras de California y se detalla en la norma AASHTO T420 (ASTM D 2872).

En muchos países de Sudamérica se simula la etapa de oxidación del asfalto por efecto del mezclado y la compactación empleando el llamado “Índice de Oxidación” o también conocido como Índice de Durabilidad (ID) y es la relación de la viscosidad a la temperatura de 60°C del asfalto envejecido en la prueba de RTFO y la viscosidad del asfalto original. La especificación para este Índice de Oxidación es de máximo 3.0 para algunos países y de 3.5 para otros.

En un estudio realizado en México por Calderón, (2015) desarrollaron una comparación del Índice de Durabilidad del asfalto EKBE 64-22 con asfaltos de diversos países, México, USA, Colombia, Panamá, Argentina, El Salvador, Ecuador, Costa Rica y Guatemala. Los resultados del Índice de Durabilidad de las diferentes muestras del asfalto obtenidas en la investigación, fueron las siguientes: México, 7.0, USA, 3.0, Colombia, 2.8, Panamá, 3.5, Argentina, 2.0, El Salvador, 3.3, Ecuador, 4.4, Costa Rica, 4.0 y Guatemala, 4.9. El Índice de Durabilidad promedio del asfalto mexicano es el más alto demostrando que el mismo es muy susceptible a la oxidación.

Ante los altos valores de envejecimiento que presenta el asfalto mexicano EKBE 64-22 en comparación con el resto de los asfaltos en América se hace necesaria esta investigación que pretende demostrar como el residuo del café incorporado a la mezcla mejora sus propiedades e impida y disminuya este proceso.

1.3 Hipótesis:

El residuo de café usado en ligantes asfálticos como aditivo modifica sus propiedades mecánico - reológicas provocando una reducción en la oxidación y por ende se retrasa el envejecimiento en el ligante.

1.4 Objetivo General

Modificar asfalto EKBE 64-22 con diferentes concentraciones de biomasa de café con el fin de reducir su proceso de envejecimiento.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de polímeros, hule molido de neumático o biomateriales que sean sustancias estables en el tiempo o a cambios de temperatura, que son añadidos al material asfáltico para mejorar sus propiedades físicas, reológicas y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface en el material pétreo, y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación o ahuellamiento, por factores climatológicos y por el tránsito vehicular, mejoran su respuesta ante los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga, y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a la variación de la temperatura (Rondón, 2008).

Las investigaciones realizadas para la utilización de biomateriales como adiciones en la construcción en China, Brasil, Perú, Uruguay y Colombia, iniciaron a comienzos de los años 90 con la construcción de plantas para la quema de la cascarilla de arroz y obtención de cenizas en grandes cantidades aprovechadas como material de construcción. Dentro de las investigaciones en curso está la Universidad Nacional de Colombia, en la sede Antioquia donde se realizó un análisis para verificar la resistencia de este material como aditivo con diferentes pre-tratamientos (Maxil, 2006). La Universidad Nacional de Ingeniería de Perú (UNI) proyecta masificar el uso de la adición de biomateriales para la proyección en el futuro de mezclas que permitan desarrollar estructuras de pavimentos seguras y de bajo costo en diversas zonas de aquel país (Koch, 2011).

Presentó Reyeset (2013) una investigación mediante la cual al introducir, cáscara de arroz, era viable reducir la temperatura de fabricación y compactación de mezclas asfálticas en 20°C. El estudio se fundamentó en primera instancia en la determinación de los porcentajes óptimos de biomateriales que deben ser adicionados al asfalto de penetración B-60/70 para modificar su viscosidad. Posteriormente usaron el asfalto modificado en la fabricación de mezclas asfálticas para evaluar el efecto en sus propiedades mecánicas y dinámicas. Los resultados obtenidos establecieron que existe un comportamiento similar a las mezclas convencionales en cuanto a resistencia a la tracción directa, módulo dinámico y leyes de fatiga.

Menciona Jalkh (2017) que la modificación en las propiedades fisicoquímicas del aglutinante asfáltico producto de la adición de *subproducto de café*, siendo este subproducto aceite extraído del grano mediante un proceso de pirólisis, presenta un nuevo potencial para usar este biomaterial como rejuvenecedor sostenible para aglutinantes de asfalto envejecidos o dañados. Además de controlar el proceso de oxidación y la duración de éste, se puede utilizar para personalizar las viscosidades dependiendo de las modificaciones deseadas, basadas en las características del aglutinante. Los resultados muestran que la oxidación afecta significativamente el aceite extraído del grano de café, al aumentar la liberación de ácidos grasos y ruptura de dobles enlaces. Esto último, además de la polimerización y liberación de compuestos de alto peso molecular, aumenta la viscosidad de la mezcla mientras conserva su comportamiento newtoniano. Los resultados señalan que las muestras modificadas poseen valores de peróxido de 6.73 meq peróxido / kg y un índice de acidez de 10,92 mg de KOH / g y que en la medida que aumenta el tiempo de oxidación, la acidez en el aceite también aumenta; sin embargo, se observó que más allá de 12 horas de oxidación hubo una disminución significativa en el valor de

yodo, un fenómeno asociado con la ruptura de doble enlace. Además, los resultados de la caracterización reológica mostraron que la adición de 1, 5, 10, 12 y 15% de aceite de café fue capaz de restaurar el comportamiento lineal del ligante de asfalto que se había perdido después del proceso de envejecimiento inducido. En comparación con el aglutinante no envejecido de control, todas las mezclas dieron como resultado una mayor recuperación. Investigaciones como estas contribuyen a mitigar la eliminación de desechos asfálticos y de alimentos, deja demostrado tanto sus potencialidades para modificar las propiedades físicas del asfalto envejecido como que son desechos de material renovable.

Demostó Santos (2005) que los valores de viscosidad de los ligantes con adiciones de biomaterial a 40 y 100 ° C muestran el aumento significativo después de 12 h, causado por la oxidación inducida. Se informó que las viscosidades aumentaron más de dos veces después de 24 h de oxidación y continuaron este comportamiento luego de 48 h. Este aumento en las viscosidades de los aceites podría estar relacionado con los cambios en la estructura física de las moléculas, así como con la polimerización inducida causada por la oxidación extensiva a lo largo del tiempo. Esto se debe principalmente a la formación de compuestos de alto peso molecular que resultan de la ciclación y polimerización a altas temperaturas, lo cual es evidente por la disminución en los valores máximos de peróxido después de 6 horas de oxidación.

Aplica Palacio (2013) el crudo de palma como un aditivo modificador de la viscosidad del asfalto base, su utilización y dosificación obedeció a los parámetros que se usan para dichos objetivos, es decir, se establece una cantidad que sea menor a 1%, controlando los resultados obtenidos con cada porcentaje y la temperatura de producción de la mezcla se logró disminuir de 155°C a 126°C. Para tal efecto se consideraron cantidades de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1.0% generando con

estos valores una regresión logarítmica en el plano viscosidad vs temperatura. Se realizaron ensayos de viscosidad para la mezcla de asfalto base y aceite crudo de palma en los porcentajes de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1.0% y a diferentes temperaturas, y a distintas muestras, las cuales fueron obtenida de muestras brindadas por las plantas extractoras de aceite de palma “Dismaprim S.A.S” y “Palmagro S.A.” donde se puede observar que el crudo de palma procedente de “Dismaprim S.A.S”, y con el 1% de adición con relación al peso del asfalto, posee el mayor potencial reductor de la viscosidad. Las pruebas de laboratorio mostraron al crudo de palma como un aditivo de gran potencial reductor de viscosidad y a su vez la mezcla producida con este refleja una buena resistencia mecánica y desempeño producidas a menor temperatura.

Aceite de motor usado. El residuo de mayor generación en la industria automotriz es el aceite de motor usado, entre el año 2004 al 2012 se registraron 416,599 toneladas de este residuo (SEMARNAT, 2012). Debido a su alta insolubilidad y baja biodegradación son clasificados como residuos peligrosos (Manzanarez & Ibarra-Ceceña, 2012). Abreu et al. (2015) utilizaron este residuo (7.5 %) como un aditivo para elaboración mezclas asfálticas, con el propósito de rejuvenecer el ligante envejecido, y para estabilizarlo utilizaron 4 % de polietileno de alta densidad. Las mezclas mostraron mejor sensibilidad al agua, mayor resistencia y durabilidad que las mezclas sin aditivos, siendo factible su uso principalmente por su bajo costo en el mercado.

Existen diversas alternativas para el reciclaje de los residuos; enfocados en su aprovechamiento para la elaboración de mezclas asfálticas que son empleadas para la construcción de pavimentos. Se ha demostrado que pueden ser factibles: ambiental y económicamente; puesto que hoy en día se busca satisfacer la demanda de la población de una manera sustentable. La construcción de carreteras

a partir de residuos, permite disminuir la cantidad de éstos en vertederos, la demanda de nuevos materiales y promover la conservación de los recursos naturales (López, Pérez & Garnica, 2014).

Cao (2007) elaboró mezclas asfálticas que contenían 1, 2 y 3 % de partículas de cauchos de neumáticos (1-3 mm) mediante un proceso en seco, utilizando piedras trituradas y caliza como agregados grueso y fino, respectivamente. De acuerdo con sus resultados, concluyó que la adición de 3 % de caucho en mezclas de asfaltos mejoran las propiedades de resistencia a la deformación permanente a alta temperatura y el agrietamiento a baja temperatura. Por otro lado, Oba *et al.*, (2015) realizaron mezclas asfálticas empleando como agregados granito (9.5 mm), arena de canteras (0.5 mm) y partículas de caucho (0.6, 2.36, 4.75 mm), las cantidades de cauchos variaron de 2 a 10 % en peso de granito, donde las combinaciones ideales de caucho en términos de estabilidad y flujo fueron 10 % - 4.75 mm, 4 % - 2.36 mm y 4 % - 0.6 mm, siendo recomendadas para pavimentos de tráfico medio.

A pesar que la presente investigación va encaminada a nuevas vertientes de incorporación de material reciclado a las mezclas asfálticas no podemos dejar de citar las investigaciones que tradicionalmente conocemos y fueron pioneras en las incorporaciones a los asfaltos, también con salidas ambientalistas.

Reyes, Madrid y Salas (2007) estudiaron una mezcla asfáltica modificada con *caucho de llantas y plástico* de bolsas de leche. La caracterización dinámica de la mezcla con las cantidades óptimas de cada modificador presentó una reducción del ahuellamiento del 8% y un aumento en el módulo dinámico del 14%, lo que conlleva un incremento en la durabilidad del 25%. Los porcentajes óptimos de caucho, plástico y la combinación de los dos materiales se obtuvieron a partir de un análisis

de relación estabilidad-flujo. Los porcentajes utilizados para la modificación de asfalto fueron: caucho: 0.10%, y tiras de plástico: 0.70%. Para la combinación de los dos materiales: caucho: 75% y tiras de plástico: 25%. En general, para mezclas modificadas (bien con caucho o bien con plástico), a medida que el porcentaje de caucho y plástico aumenta, otro tanto hace el porcentaje de vacíos en la mezcla, lo que implica la dificultad de unión entre el agregado y el asfalto.

Residuos plásticos. Estos residuos son otra alternativa para la industria de la pavimentación (Casey *et al.*, 2008), específicamente en el diseño de mezclas asfálticas, dado que su generación es incontrolable, y va en aumento con el paso de los años. En el año 2011 este tipo de residuo representó el 10.9 % del total de los residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2012). Moghaddam *et al.*, (2013) recomiendan utilizar 10 % de gránulos de polietileno y polipropileno, además de rocas y arenas trituradas como agregado.

Residuos de concreto. Los residuos de construcción y demolición se generan en grandes cantidades, tan sólo en México en el 2012 se generaron 6,111 toneladas (SEMARNAT, 2012). Una alternativa para evitar que sean vertidos a los rellenos sanitarios, es como agregado en la elaboración de mezclas asfálticas debido a su alta resistencia y bajo comportamiento expansivo (Melbouci, 2009). Bennert & Maher (2005) sugieren que este tipo de residuo sea utilizado en un 25 % y mezclado con 75 % de agregados naturales, las mezclas presentaron respuesta elástica y de deformación similar al de una mezcla elaborada con agregado de alta densidad.

2.1 Asfalto modificado.

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original (las cuales dependen de su contenido de asfaltenos,

resinas y aceites), mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Coinsky *et al.*, 1994; Sheu, Storm y Mullins, 1995).

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. El uso de asfaltos modificados permite obtener mezclas asfálticas de mayor durabilidad y comportamiento bajo las cargas de tránsito. La tecnología de asfaltos modificados se emplea desde hace varios años en diferentes países del mundo. Algunos de los polímeros modificadores del asfalto empleados comúnmente se muestran a continuación:

Termoplásticos. Estos se reblandecen con calor, pueden ser solubles, al enfriarse se dejan moldear sin perder propiedades, son polímeros lineales, forman pequeñas ramificaciones. Se encuentra dentro de este grupo el polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA), poliamidas, etc.

Termoendurecibles. Formados por la base y el endurecedor no se pueden transformar después de deformarse, resinas fenólicas, epoxi, de poliéster, de poliuretano.

Elastómeros o cauchos. Polímeros insaturados, amorfos, para conseguir las propiedades elásticas se debe vulcanizar, caucho natural, caucho etileno-propileno,

butadieno-estireno (SBR), de policloropeno, elastómeros termoplásticos de butadieno-estireno (SBS).

Al utilizar cualquiera de estos modificadores, se pretende tener una resistencia al envejecimiento, a los efectos del agua y en general a las condiciones climáticas, buscar una mejor adherencia con los pétreos, mejorar las propiedades elásticas, de viscosidad y en general, con estas condiciones se alcanzan mezclas con mayor resistencia a la deformación y a la fatiga.

2.2 Tipos de asfaltos existentes

La mayor parte de los asfaltos producidos son utilizados en trabajos de pavimentación, destinándose una producción menor para aplicaciones industriales, como impermeabilizante, aislantes, etc. De acuerdo a su aplicación, los asfaltos podemos clasificarlos en dos grupos:

a) Asfaltos para pavimento.

a.1) Cemento Asfáltico.

a.2) Asfaltos cortados.

a.3) Emulsiones asfálticas.

b) Asfaltos Industriales.

b.1) asfaltos oxidados.

a.1) Cemento Asfáltico: Los cementos asfálticos son preparados especialmente para el uso en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material para su aplicación en trabajos de pavimentación, pues aparte de sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la mayoría de los ácidos, sales y álcalis.

a.2) Asfaltos cortados: los asfaltos cortados, también conocidos como asfaltos diluidos o cut-baks, resultan de la ductilidad del cemento asfáltico con destilados del petróleo. Los diluyentes utilizados funcionan como vehículos, resultando productos menos viscosos que pueden ser aplicados con temperaturas más bajas. De acuerdo con el tiempo de curado determinado por la naturaleza del diluyente utilizado, los asfaltos cortados se clasifican en:

- RC – Asfaltos cortados de curado rápido.
- MC – asfaltos cortados de curado medio.
- SC – asfaltos cortados de curado lento.

Sigla normalmente seguida de un número que indica su grado de viscosidad.

a.3) Emulsiones asfálticas: son dispersiones de cemento asfáltico en fase acuosa, con estabilidad variable. El tiempo de quiebre y de viscosidad de las emulsiones dependen, entre otros factores, de la cantidad y calidad de los agentes emulsificantes. La cantidad de emulsificantes y aditivos químicos utilizados varía generalmente de 0.2% a 5% y la cantidad de asfalto es del orden del 95%.

El color de las emulsiones asfálticas antes del rompimiento es marrón y después del rompimiento negro, constituyendo esta característica un elemento auxiliar para la inspección visual y constatación rápida de la buena condición del producto. Las partículas de asfalto dispersas en la emulsión son visibles al microscopio variando de su tamaño de 0.1 a 10 micrones. Las emulsiones asfálticas se clasifican según el tipo de carga de la partícula y tiempo de quiebre.

En cuanto a la carga de partícula, pueden ser:

- Catiónicas.
- Aniónicas.

Y en cuanto al tipo de rompimiento:

- Rompimiento rápido.
- Rompimiento medio.

- Rompimiento lento.

b.1) asfaltos oxidados: los asfaltos oxidados o soplados, son asfaltos calentados y sometidos a la acción de una corriente de aire con el objeto de modificar sus características normales, a fin de adaptarlos para aplicaciones especiales. Los asfaltos oxidados son utilizados generalmente para fines industriales como impermeabilizantes, película protectora, etc. El proceso de oxidación produce en el asfalto las siguientes modificaciones físicas principales: - aumento de peso específico y consistencia. - disminución de ductilidad. - disminución de susceptibilidad térmica. En cuanto a la composición química elemental del asfalto, los procesos de oxidación producen aumento en contenido de carbono y una correspondiente disminución de hidrogeno.

2.3 Asfalto y sus propiedades

El asfalto es un material cementante, muy adhesivo e impermeable, que puede encontrarse en yacimientos naturales, o producirse en refinerías (Ruiz, 2013). Se trata de una mezcla compleja de moléculas compuesta principalmente de carbono e hidrogeno (hidrocarburos), así como de azufre, oxígeno, nitrógeno, entre otros. Es de los materiales más antiguos de la ingeniería utilizados por el hombre, y aun es bastante utilizado en la construcción de carreteras y, en cantidades menores, en trabajos de impermeabilización, así como base de adhesivos y en la industria automotriz y eléctrica, debido a sus propiedades adhesivas e hidrofóbicas (Múnera y Ossa, 2014). La composición específica del asfalto dependerá en gran medida de la procedencia del petróleo crudo del cual provenga.

Los asfaltos tienen propiedades ligantes y aglutinantes, compuestos en gran parte por hidrocarburos de consistencia semisólida a temperatura ambiente, pero pueden ser más fluidos en la medida en que se les incrementa la temperatura (Arenas,

2000). A nivel industrial se trabaja con asfaltos derivados del petróleo o asfaltos residuales, como se les llama para diferenciarlos de los asfaltos naturales. Uno de los aspectos que dificulta el estudio del comportamiento de los asfaltos es su condición termoplástica, es decir, que al incrementarse la temperatura presenta las características de un flujo newtoniano, esto es, la velocidad de desplazamiento es proporcional al esfuerzo de corte aplicado. En este caso la viscosidad es el coeficiente de proporcionalidad a esa temperatura, o sea, es independiente del tiempo de carga aplicado. Así mismo, al disminuir la temperatura se comporta como un flujo no newtoniano, o lo que es igual, como un flujo viscoelástico cuando ha sufrido envejecimiento o se ha sometido a baja temperatura (Arenas, 2000). En este caso, la viscosidad depende de los cambios que se producen en el esfuerzo aplicado. Esta condición se llama “susceptibilidad al corte” o “índice de corte”, el cual aumenta a medida que el asfalto se envejece.

Ya a mediados del siglo pasado se tenía bien claro cuáles eran los factores claves para el estudio de los ligantes.

Hoiberg (1965) tenía muy claro que la composición química (estructura y asociaciones moleculares) del ligante asfáltico influye en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, así como en su desempeño. Sus estudios permitieron demostrar a la comunidad científica en su momento, que las propiedades reológicas del asfalto dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo.

Este material es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa. Las primeras experiencias para descubrir su estructura, fueron desarrolladas por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffer y Saal en 1940, en base a limitados procedimientos analíticos. Existen varias clasificaciones

para los grupos de constituyentes que componen el asfalto. Una de las más usadas es la que separa el asfalto en:

- Asfaltenos: Son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones, se encuentran cadenas con cantidades apreciables de elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno. Los asfaltenos le dan la característica de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los maltenos.

- Maltenos: a) Resinas: Son moléculas de menor peso molecular, que tienen un mayor número de ramificaciones en las cadenas. También se observa la presencia de azufre y nitrógeno en sus cadenas, pero en menor frecuencia. b) Aceites: Moléculas de peso molecular mucho menor, sus cadenas son menos ramificadas y con pocos anillos de benceno. Podemos decir que los maltenos están ligados con las propiedades elásticas de los asfaltos. Observamos que al pasar de los asfaltenos a los aceites, existe una disminución gradual de componentes aromáticos y un aumento en el carácter parafínico.

En forma general, la presencia de parafina influye en las propiedades reológicas del asfalto. La estructura cristalina de la parafina sólida ocasiona un endurecimiento mayor en el asfalto; a temperaturas más elevadas la parafina se licua, lo que ocasiona una variación sensible en las viscosidades del asfalto. La parafina disminuye la adhesividad de los asfaltos en los agregados y una elevada cantidad de ella, puede provocar un envejecimiento prematuro del ligante, influyendo sobre la duración y tiempo de vida útil del pavimento.

El asfalto se presenta como un líquido viscoso constituido esencialmente por hidrocarburos o sus derivados, a continuación citamos algunas de sus características:

- Consistencia: Se refiere a la dureza del material, la cual depende de la temperatura. A altas temperaturas se considera el concepto de viscosidad para definirla.
- Durabilidad: Capacidad para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes envejecedores.
- Susceptibilidad Térmica: Variación de sus propiedades con la temperatura.
- Pureza: Definición de su composición química y el contenido de impurezas que posee.
- Seguridad: Capacidad de manejar el asfalto a altas temperaturas sin peligros de inflamación.

2.4 El café y sus propiedades

Según Maroto *et al.*, (2015) el origen del café corresponde al Noroeste de África, en Etiopía. Sin embargo, Canet y Soto (2016) recalcan que el café es originario de Arabia y su uso se remonta al siglo X, siendo los árabes los primeros en desarrollar el proceso productivo de la bebida.

En la actualidad, este fruto se cultiva en casi todas las partes del mundo, pero se produce con gran fuerza en las zonas tropicales del planeta y subtropicales del África, Asia, Centro y Sur América, especialmente en Ecuador, Colombia, Brasil, México y Perú (Canet Brenes, 2016; OIC, 2016).

A nivel mundial, las especies cultivadas de valor económico corresponden a *Coffea arabica* Linneo (Arábica) y *Coffea canephora* Pierre Ex Froehner (Robusta) debido a sus características organolépticas como aroma y acidez pronunciada (Canet Brenes, 2016).

La producción y consumo del café se ha elevado en los últimos años. En el periodo de octubre de 2015 a setiembre de 2016 se estima que el consumo de café fue de 151 millones de bolsas de 60 kg a nivel mundial, siendo 9,8% mayor comparado al mismo periodo durante los años 2012 – 2013. Los países que registraron mayor consumo en el año 2015 fueron Finlandia, Suecia y Dinamarca con 12.2, 10.1 y 6.9 kg per cápita respectivamente. Para los países de América del Sur, el mayor consumo lo tiene Brasil con 5.9 kg per cápita, seguido por Venezuela con 3.2 kg per cápita. El Perú tiene un consumo menor con 0.48 kg per cápita durante el 2015 (ICO, 2016).

Referente al comercio para el 2019, el valor del café verde sin procesar en el país de origen fue de más de USD 25 mil millones en 2017/18 (ICO, 2019a). La valoración de todo el sector cafetero se multiplicó y se calcula que es de más de USD 200 mil millones en total (Samper *et al.*, 2017). La mayor parte del valor se crea en los países importadores de café. Para los últimos dos años se calcula un exceso en la producción, en 2018/19 habrá sido de casi 8 millones de sacos de 60 kg, el equivalente de cerca del 5% de la producción mundial.

Para obtener el grano que se comercializa es necesario que las cerezas pasen por un proceso de remoción y limpieza, por medio de condiciones secas o húmedas y es a partir del procesamiento húmedo que se originan diversos subproductos, los cuales son considerados principalmente como desecho (Esquivel & Jiménez, 2012; Temis-Pérez *et al.*, 2011); la pulpa de café es uno de los principales subproductos generados (Jaisan *et al.*, 2015; Kefale *et al.*, 2012). El valor estimado por cada 2 t de cerezas de café procesadas es de aproximadamente 1 t de pulpa de café (Roussos *et al.*, 1995), por lo que la producción mundial asciende a 22 MMt (Pedraza *et al.*, 2016); mientras que en México la producción estimada es de 2 a 3 t/ ha por año (López Altunar *et al.*, 2011).

El café es una mezcla química compleja de carbohidratos, lípidos, compuestos nitrogenados, vitaminas, minerales, alcaloides y compuestos bioactivos (Preedy *et al.*, 2015) que determinan la calidad, aroma y sabor propio del café. Cien gramos de granos de café sin tostar contiene 11,7 gramos de proteína, 10,8 gramos de grasa total, 68,2 gramos de carbohidratos, 178 mg de fósforo, 2,90 mg de hierro (CENAN, 2009), entre otros compuestos.

Entre los compuestos bioactivos más importantes del café están los compuestos fenólicos como el ácido clorogénico y sus derivados; las metilxantinas como la cafeína, teofilina y teobromina; los diterpenos, el ácido nicotínico (vitamina B3) y su precursor como la trigonelina, magnesio y potasio (Patriche *et al.*, 2015).

La composición química del café en grano verde varía durante el proceso de producción del producto listo para su consumo. Diversos estudios han demostrado que el proceso de tostado afecta positiva y negativamente el contenido total de los compuestos bioactivos (Perez-Hernandez *et al.*, 2013; Naranjo *et al.*, 2011; Priftis *et al.*, 2015). Dependiendo de la temperatura y el tiempo utilizado durante el tostado de los granos de café, existe una disminución proporcional de los compuestos fenólicos debido a la hidrólisis de los mismos (Priftis *et al.*, 2015). Sin embargo, en el mismo proceso, como resultado de la reacción de Maillard se obtiene las melanoidinas, compuestos que también intervienen en la calidad del producto (Bidel *et al.*, 2010).

Asimismo, el tipo de preparación o extracción que se utilice afecta el contenido químico y las propiedades sensoriales de la bebida de café. La presión que se utiliza durante la extracción, el tipo de proceso y el dispositivo para realizar la extracción, la calidad del agua y el volumen del extracto alteran la composición de la bebida del café (Naranjo *et al.*, 2011). El tipo de preparación que se utilice va a depender del

contexto geográfico, cultural y social así como también de las preferencias del consumidor (Gloess *et al.*, 2013).

Los polifenoles son sustancias aromáticas que se derivan de los ácidos mevalónico y shikímico, estos compuestos se encuentran principalmente en plantas y bebidas que provienen de ellas (Romero, 2012), como el café. Una taza de 100mL de café filtrado contiene 266,7 mg de polifenoles totales, siendo una de las bebidas con mayor contenido de estos compuestos (Sánchez, 2005). El 98% del contenido total de polifenoles del café, están conformados por los ácidos hidroxicinámicos (Preedy *et al.*, 2015; Bidet *et al.*, 2010), siendo el ácido 5-O-Cafeoilquinico el más abundante con 43,1 mg en una taza de 100 mL de café arábica (Neveu *et al.*, 2010) y 75,8 mg en una taza de 100 mL de café robusta. Los ácidos feruloilquinico y dicafeoilquinico también pertenecientes a este grupo se encuentran en menor proporción (< 0,2%) (Godos *et al.*, 2014).

Los ácidos clorogénicos (CGA) son ésteres formados por la unión de ácido quínico y ácidos tras-cinámico, siendo el ácido cafeico y ferúlico los que conforman este último grupo en el café. Los CGA actúan como antioxidantes inhibiendo la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), ofreciendo protección hepática, actividades hipoglicémicas y antivirales (Tresserra *et al.*, 2015). Estos compuestos son los responsables del aroma, astringencia y acidez de la bebida del café (Puerta, 2000).

Otros ácidos fenólicos que se encuentran en el café son las isoflavonas, ligninas, taninos y antocianinas. Las isoflavonas y ligninas pertenecen al grupo de fitoestrógenos que tienen capacidad protectora contra la hipercolesterolemia, carcinogénesis y osteoporosis (Saura, 2014).

El café es uno de los productos de mayor importancia comercial en el mundo. El grano de café contiene diversos componentes (agua, carbohidratos, lípidos, aminoácidos, ácidos alifáticos, cafeína, y minerales) que dan lugar a complejas reacciones durante el proceso de tostado y le confieren sobresalientes propiedades organolépticas. Entre los más de 800 compuestos volátiles que han sido identificados en el café tostado aproximadamente 40 son los responsables del aroma característico del café (Belitz, 2009). El tostado del café se realiza entre los 200 y 240 °C a diferentes períodos de tiempo dependiendo de las propiedades que se deseen para el producto final. El proceso de tostado produce en el grano de café una pérdida de materia en forma de CO₂, vapor de agua y compuestos volátiles; también genera la transformación o degradación de azúcares, polisacáridos, aminoácidos y ácidos clorogénicos, lo que resulta en un incremento de lípidos y ácidos orgánicos. Si bien se tiene establecido que los productos formados durante el tostado son altamente dependientes del perfil de temperatura-tiempo, las que producen cientos de compuestos aún no han sido explicadas (Franca, 2005).

Los cafés procesados presentan una actividad anti-oxidante mayor que sus respectivos granos verdes de origen. En el caso del café caracolillo, se observó una disminución de los principales compuestos fenólicos identificados. Sin embargo, esto no afecta la actividad antioxidante total, probablemente al contenido alto de melanoidinas. Es posible que la adición de azúcar al café caracol estimule la formación de melanoidinas, mejorando así la actividad antioxidante.

Por otro lado, durante la elaboración del café soluble, los fenoles, melanoidinas y cafeína se concentran significativamente, como consecuencia, la actividad antioxidante aumenta.

Durante el procesamiento del café, el tostado afecta marcadamente su composición, lo que puede reducir la actividad antioxidante, debido a la degradación del ácido clorogénico y otros compuestos fenólicos. Sin embargo, se ha encontrado que la actividad antioxidante del café tostado se puede mantener debido a la formación de los productos de la reacción de Maillard (Budryn *et al.*, 2009). Durante la última etapa de la reacción de Maillard, se forman compuestos poliméricos de color café llamadas melanoidinas. Éstas influyen en el color, sabor y textura de los alimentos sometidos a temperaturas altas. Entre algunas actividades biológicas importantes de las melanoidinas se encuentran la actividad antioxidante y quelante (Tagliazucchi *et. al.*, 2010).

Siendo este producto una de las bebidas más consumidas en el mundo y el segundo producto comercializado más grande después del petróleo. Debido a la gran demanda de este producto, se generan grandes cantidades de residuos en la industria del café, que son tóxicos y representan serios problemas ambientales. El café molido (SCG) es el principal residuo de la industria del café, obtenidos durante el proceso para preparar el "café instantáneo". Recientemente, se han hecho algunos intentos para usar estos residuos para la producción de energía o compuestos de valor agregado, como estrategias para reducir sus niveles de toxicidad, mientras se les agrega valor (Mussatto, 2011).

En algunos casos, SCG se utiliza como combustible en calderas industriales de la misma industria debido a su alto poder calorífico de aproximadamente 5,000 kcal / kg, que es comparable con otros residuos agroindustriales (Silva *et al.*, 1998). Sin embargo, se debe prestar atención a la generación de partículas, que pueden afectar la calidad del aire cerca de la industria (ABNT, 1987).

Alabama (2008), demostró que SCG puede usarse como una fuente potencial para producir biodiesel y pellets de combustible, entre otros productos de valor agregado, como H₂ y etanol, SCG contiene aproximadamente un 15% de aceite que se puede convertir en cantidades similares de biodiésel mediante procesos complejos de extracción. Los residuos sólidos restantes se pueden usar para producir etanol y pellets de combustible (Kondamudi *et al.*, 2008). En este sentido, también se ha evaluado la viabilidad de utilizar procesos de extracción de fluidos supercríticos para obtener la fracción lipídica de SCG (Couto *et al.*, 2009).

De todas las investigaciones realizadas pocas se han acercado a la aplicación en el sector constructivo, o como agregados al asfalto, sólo han sido agregados los aceites extraídos del compuesto como rejuvenecedor de los ligantes, proceso complejo que encarece el producto final, no hay referencias de la incorporación en mezclas como filler o material de relleno. Hoy en día, existe una gran presión política y social para reducir la contaminación derivada de las actividades industriales. Casi todos los países desarrollados y subdesarrollados están tratando de adaptarse a esta realidad modificando sus procesos para que sus residuos puedan ser reciclados. En consecuencia, la mayoría de las grandes empresas ya no consideran los residuos como residuos, sino como materia prima para otros procesos (Mussatto *et al.*, 2006). Debido a la presencia de material orgánico, Cascara de café (CS) y Café molido (SCG) según muestra la figura 1, son residuos altamente contaminantes y requieren grandes cantidades de oxígeno para degradarse. Además, la cafeína, los taninos y los polifenoles presentes en estos materiales les confieren una naturaleza tóxica. Por lo tanto, CS y SCG representan un peligro de contaminación si se descargan al medio ambiente. A pesar de esta característica negativa y las grandes cantidades que se generan, hay pocos estudios centrados en su uso en diferentes y rentables aplicaciones. Además de

agregar valor a estos materiales no utilizados, encontrar formas alternativas para usarlos sería útil para disminuir su impacto en el medio ambiente. Entre los estudios realizados hasta ahora con estos desechos de la industria del café, la mayoría de ellos se centraron en el uso de SCG.



Figura 1. Residuos de café. (Fuente Elaboración propia, 2019)

2.5 Principales modificadores utilizados en el asfalto

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90% de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces en su totalidad, sin embargo existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto que poseen, los petróleos se clasifican en: petróleos crudos de base asfáltica, petróleos crudos de base de parafina y petróleos crudos de base mixta (contiene parafina y asfalto).

Desde hace bastante tiempo se emplea caucho como modificador, ya sea natural o sintético, con tasas no superior al 5 %. Actualmente existen los polímeros sintéticos de formulación especial que resultan muy competitivos. Asfaltos modificados con estos polímeros han sido ensayados en pavimentos de varios países. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

POLÍMERO TIPO I: Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastómeros radiales de tipo tribloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno – Butadieno - Estireno (SBS) o Estireno - Butadieno (SB), entre otras (Casanova, 2017). Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

POLÍMERO TIPO II: Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómeros lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

POLÍMERO TIPO III: Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etileno – Vinil - Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras (Casanova, 2017). Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales. La obtención de una buena mezcla de asfalto y polímero, dependerá de que el polímero adicionado tenga una estructura química que le permita una buena dispersión en el asfalto, de modo de lograr una estructura de malla, la cual a su vez dependerá del grado de

productos aromáticos que contenga el asfalto. El grado de modificación en la elasticidad dependerá del tipo de polímero empleado y su concentración. Los nuevos procesos en los cuales el polímero se asocia con el asfalto a través de una reacción química, incrementan notablemente las propiedades reológicas del asfalto.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

3. METODOLOGÍA

En esta sección se muestra la metodología para proceder a una correcta caracterización de un asfalto modificado con biomaterial (café) para determinar cómo puede influir en las condiciones de la muestra en estudio. En la figura 4 se muestra el procedimiento realizado de forma esquemática.

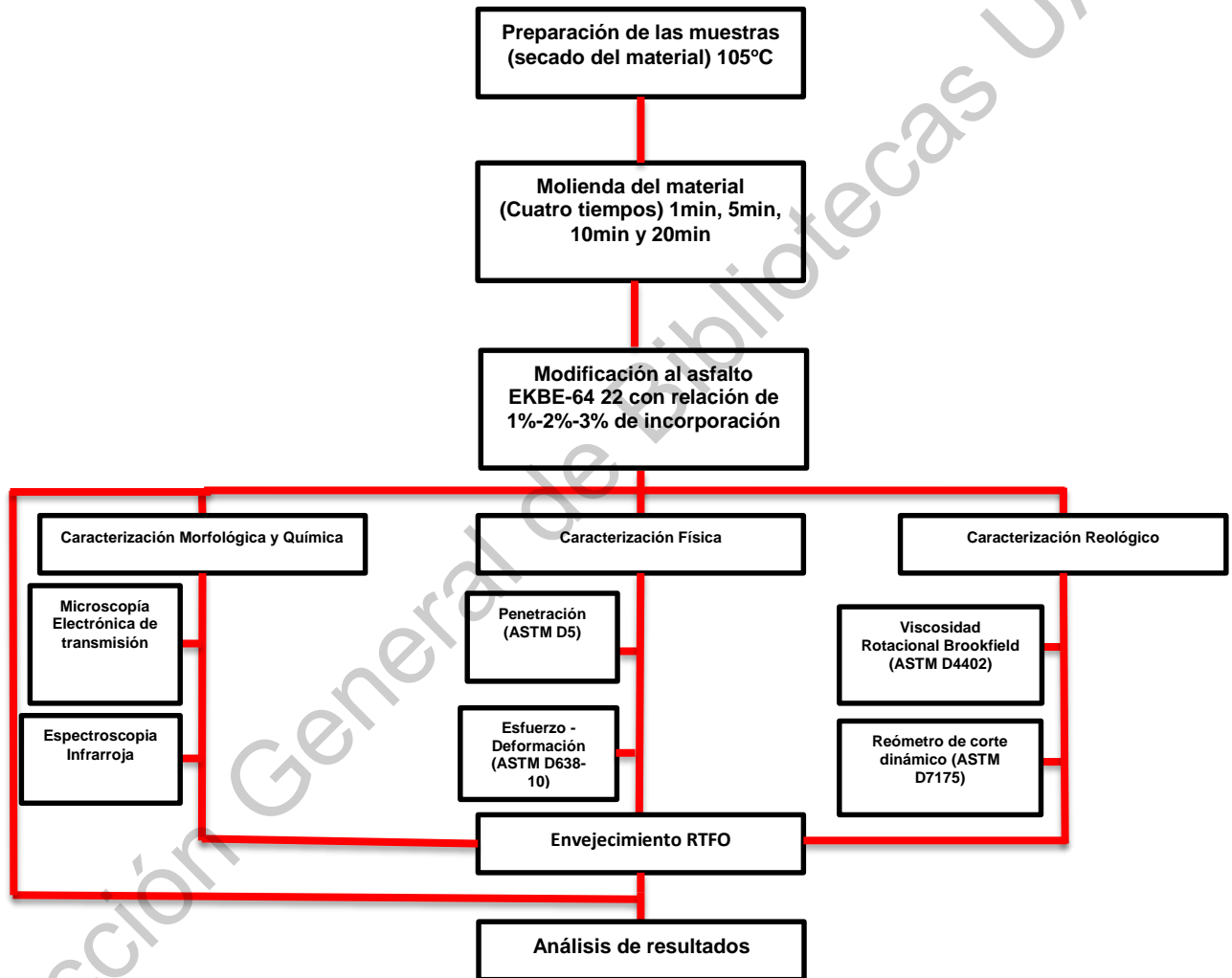


Figura 2. Metodología Experimental realizada. (Fuente: Elaboración propia)

3.1 Preparación de las mezclas de asfalto-café

En los inicios se realizó la dosificación del biomaterial café, los materiales se muestran en las figuras 3. Se decidió elaborar mezclas con concentraciones del biomaterial en porcentajes bajos, tales como: 1%, 2%, y 3%, con diferentes tiempos de molido del café en un molino eléctrico buscando diferente tamaño de partícula, para cada una de estas concentraciones que se incorporaron a las mezclas. Los tiempos de molido o trituración fueron 1min, 5min, 10min y 20min. Esto con el fin de tener una referencia del comportamiento del biomaterial en el asfalto convencional para dos variables diferentes, porcentaje de adición y tamaño de partícula del aditivo, el cual está estrechamente vinculado al tiempo de molienda.



Figura 3. a. Equipo para el mezclado e incorporación del biomaterial café, b. Asfalto EKBE 64-22, c. Biomaterial, (Fuente elaboración propia, CFATA, UNAM)

Para la dosificación de las muestras se utilizó una balanza *Fisher Science Education* con capacidad de 200 gramos y precisión 0.01 gramos, el equipo que se utilizó para el procedimiento de mezclado del asfalto-biomaterial, es el mostrado en la figura 2 a., consta de un agitador mecánico de asfalto, mordazas de sujeción para el termómetro y el agitador, mantilla de calentamiento y regulador de temperatura.

Para la elaboración de las mezclas se calentó el asfalto virgen en una estufa Felisa a una temperatura de 110 °C durante una hora logrando una consistencia fluida en el asfalto base para colocarlo en latas de 250 gramos figura 2 b., estas latas de forma independiente se colocaron en la mantilla de calentamiento, donde se elaboró las mezclas. La propela de agitación se sitúa a una altura de $\frac{1}{4}$ sobre la lata, el control de la temperatura fue controlado mediante un termómetro laser INFRARED capas de cuantificar un intervalo de (-50°C a 380°C).

El equipo de agitación es asegurado con ayuda de las pinzas para realizar el proceso de mezclado a una velocidad asignada de 150 rpm, cuidando con la ayuda del termómetro laser que la temperatura oscile entre 100-160°C, esto es fundamental según estudios y metodologías precedentes a la investigación propia de asfaltos modificados, en el intervalo de temperatura de 100 -140°C se le incorporó de manera circular el biomaterial.

Al llegar a la temperatura de 160°C se continuó el proceso de mezclado por una hora manteniendo esta temperatura, hasta que no se observaron grumos en mezcla como parte de la adición. Se realizó este procedimiento para cada una de las mezclas a una concentración de 1%, 2%, 3% en peso y para cuatro grados de trituración del material con tiempos de molido de 1min, 5min, 10min y 20min.

3.2 Caracterización Química y Morfológica.

Los métodos analíticos nos ayudan a conocer la cantidad y los tipos de compuestos que componen la mezcla mediante instrumentos y métodos para separar, identificar y cuantificar la materia. El estudio se realizó mediante la combinación de Espectroscopia Infrarroja y Microscopia Electrónica de Transmisión con la intención de detectar los componentes en muestra.

3.2.1 Espectroscopia Infrarroja

3.2.1.1 Introducción

Creswell *et al.*, (1979) y Skoog *et al.*, (2001), definen a la espectroscopia como la ciencia que estudia la interacción de la luz con los átomos y moléculas; dicha luz o radiación electromagnética se considera en forma de onda, y algunas de sus propiedades físicas se entienden mejor con las características de onda, mientras otras se entienden mejor tomando en cuenta su naturaleza de partículas, de esta manera se dice que la luz es dualística con respecto a su naturaleza.

El propósito de los métodos analíticos, es medir la cantidad de radiación que producen o absorben las moléculas o átomos que se estudian. Según la región del espectro electromagnético, que se abarque, los métodos espectroscópicos se clasifican en: rayos gama, rayos X, radiación ultravioleta (UV), radiación infrarroja (IR), microondas y radiofrecuencias (RF). La radiación electromagnética, es la luz en las regiones del UV/visible y del IR, la cual es una forma de energía que se transmite a una gran velocidad (un millón de veces mayor que la velocidad del sonido) en el espacio, también puede definirse como una onda con propiedades tales como longitud, frecuencia, velocidad y amplitud, ya que es una onda de luz, se propaga en el vacío fácilmente, (Creswell *et al.*, 1979). Las técnicas espectroscópicas basadas en las radiaciones ultravioleta, visibles e infrarrojas son conocidas como los métodos ópticos. Los resultados de estas técnicas se expresan gráficamente con un espectro, el cual es una gráfica de la radiación contra la frecuencia o longitud de onda.

El espectro infrarrojo de una molécula es lo que da por resultado las transiciones entre dos niveles de energía de vibración diferentes (Creswell *et al.*, 1979). La unidad de longitud de onda para la región del espectro de radiación infrarroja es el

micrómetro o micra (μm) 10^{-6} m (Skoog *et al.*, 2001). De esta manera, la obtención de un “espectro infrarrojo” es causada por la vibración de los diferentes grupos funcionales en la muestra que interactúa con el haz infrarrojo. Este espectro se divide en las siguientes regiones: infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés), en donde se producen absorciones debidas a sobretonos; infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés), en donde tienen lugar vibraciones moleculares fundamentales; y por último se tiene el infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés), en donde se producen absorciones debidas a cambios rotacionales moleculares (Muñoz, 2013).

Steyer *et al.*, (2002) demuestran la efectividad de la técnica de espectroscopia infrarroja de región media con transformada de Fourier (FT-MIR) como una técnica alternativa que tiene las siguientes ventajas:

- Adquiere espectros en poco tiempo.
- Obtiene espectros con volúmenes despreciables de la muestra, con preparaciones mínimas o nulas.
- Es escalable a un desarrollo en línea.

Por otra parte, los seis grupos funcionales del asfalto que contiene el grupo carbonilo, (ácidos carboxílicos, aldehídos, amidas, anhídridos, ésteres y cetonas) pueden ser encontrados con la ayuda de la técnica de la espectroscopia infrarroja de la transformada de Fourier (FTIR) (Yao *et al.*, 2015).

3.2.1.2 Procedimiento

Esta técnica permite identificar la composición de las muestras mediante la detección de los grupos funcionales existentes en ellas, las muestras fueron analizadas con un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet 6700, el cual se muestra en la (figura 4). Primero se preparó muestras de 0.1 gramos aproximadamente del

material, asfaltos modificados en sus diferentes porcentajes, el asfalto base sin modificar y el biomaterial (café) natural y en sus diferentes tiempos de molido, se colocó una por una sobre la máquina, luego se procedió a iniciar el análisis en el software del equipo, el mismo brindó los espectros en absorbancia y transmitancia, para el análisis de las bandas principales.

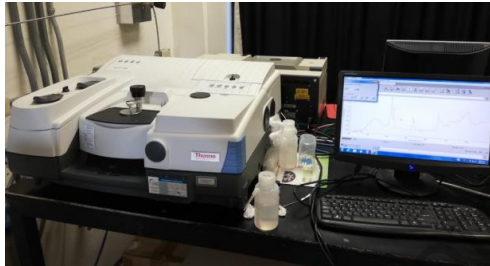


Figura 4. Espectrómetro Thermo Scientific Nicolet 6700 (LACAM. CFATA, UNAM Campus Juriquilla)

3.2.2 Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM, por sus siglas en inglés).

3.2.2.1 Introducción

El microscopio electrónico fue concebido en 1931 en Alemania por Max Knoll y Ernst Ruska con el fin de alcanzar una capacidad de aumento superior, podemos distinguir dos tipos de microscopio electrónico: el microscopio electrónico de transmisión y el microscopio electrónico de barrido.

La potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 angstroms (1 angstrom es 0,0000000001 metros). La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 angstroms.

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El SEM explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden dispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios (Alyamani, 2012).

El objetivo del TEM, es seguir la relación de las propiedades mecánicas con la morfología de la mezcla, ya que podemos observar una compatibilidad parcial entre el asfalto y el biomaterial, también se puede distinguir la concentración donde se da el intercambio de fases y en qué concentración tendrá un desempeño mejor.

En conclusión, esta técnica ha demostrado ser una herramienta valiosa en el establecimiento de la morfología de los asfaltos modificados, ya que permite determinar si una mezcla es o no homogénea, estable y compatible; además, se puede relacionar su estructura morfológica con sus propiedades mecánico-reológicas. (Casanova, 2017)

3.2.2.2 Procedimiento

La observación en el microscopio de las muestras elaboradas de asfalto con biomaterial, nos permitió identificar, el comportamiento del biomaterial en el asfalto, y si realmente se encuentra incorporado a la mezcla, donde se muestra que su concentración y grado de molido puede aportar una morfología diferente. De esta manera se puede encontrar una fase de asfalto continua con partículas de biomaterial dispersas, o una fase de biomaterial continuo con glóbulos de asfalto

dispersos, o dos fases continuas, dependiendo de la zona observada y las concentraciones empleadas.

Se realizó la observación en el Centro de Neurobiología del Campus UNAM Juriquilla, con un Microscopio JEOL JEM-1010 (figura 5.a), que funciona con un haz de electrones producidos por un filamento de tungsteno bien definido y dirigido en una sola línea en una columna de alto vacío, con un voltaje de 80 kV utilizado para materiales. El equipo tiene una resolución de 0.25 nm y se pueden obtener imágenes de hasta 600 mil aumentos (Casanova, 2017).

Previamente se elaboraron las muestras, primero se tomó una cantidad de menos de 0.1 gramo de cada mezcla y se disolvió en tolueno, después fueron colocadas en rejillas de cobre para la observación de estas pruebas, se incorporaron en un porta muestras (figura 5.b) para su transportación al microscopio. Las muestras se llevaron directamente al microscopio donde se colocaron de dos en dos para ser observadas, se realizó la observación a diferentes amplitudes de 50, 100 y 200 Kx para obtener mejores resultados.



Figura 5. a. Preparación de las muestras para TEM, b. Microscopio Electrónico de Trasmisión.

3.2.3 Ensayo de Horno Giratorio de Película Delgada (RTFO, por sus siglas en inglés).

3.2.3.1 Introducción

En el siguiente punto será analizado el tema referente al ensayo de película delgada en horno rotacional RTFO. Este es un procedimiento que expone una película fina de asfalto a la condición de calor y aire similares a las ocurridas durante el proceso de fabricación en una central de mezclas asfálticas en caliente, con el objeto de evaluar su envejecimiento inicial o envejecimiento a corto plazo como se conoce en muchos países e investigaciones precedentes.

Con el mismo propósito son conocidas dos pruebas:

- ✓ Ensayo de película delgada en horno (TFO)
- ✓ Ensayo de película delgada en horno rodante (RTFO)

El procedimiento de TFO consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico en un platillo de fondo plano, tal que, la muestra cubra el fondo del platillo con un espesor aproximado de 3 mm (1/8 pulgada). La muestra y el platillo se colocan, luego, en un plato giratorio dentro de un horno, y se mantiene una temperatura de 163 °C (325 °F) por cinco horas. Finalmente, se ensaya la muestra envejecida y endurecida artificialmente, para determinar su valor de viscosidad y/o penetración”.

El ensayo RTFO, (ASTM D-2872) consiste en una modificación del equipo y procedimiento del TFO, aun cuando el propósito del ensayo es el mismo. Este método se ejecuta en un horno especialmente diseñado para colocar unos frascos de vidrio semejantes a “tubos de ensayos” que contienen las muestras de material a ensayar (figura 6.b). Los tubos se colocan horizontalmente dentro del horno y se ponen a girar y rotar. La temperatura de ensayo se mantiene a 163°C. Mediante la

rotación del tubo se logra exponer directamente todo el volumen del material a la temperatura de ensayo.

Adicionalmente, una vez durante cada rotación, el tubo pasa frente a un chorro de aire caliente que permite remover cualquier vapor que se halla acumulado dentro de él. Las ventajas del procedimiento de RTFO sobre el TFO son que permite acomodar un mayor número de muestras dentro del horno (figura 6.a), y que requiere un menor tiempo de ensayo (tan solo 75 minutos) para alcanzar el mismo grado de endurecimiento que en el TFO.

El objetivo fundamental de este ensayo es determinar el efecto del calor y el aire sobre una película de materiales bituminosos semi-sólidos a partir de la variación (antes y después de la prueba) de algunas propiedades del asfalto, pruebas que se desarrollan en el cuerpo de este trabajo.



Figura 6. a. Horno Giratorio de Película Delgada, b. Tubos que portan el material a ensayar

3.2.3.2 Procedimiento (ASTM D7 175-08)

Para el correcto desarrollo del ensayo se necesita seguir un grupo de pasos importantes que se hace referencia a continuación.

En un recipiente adecuado se calienta una cantidad suficiente de material hasta su

condición de fluido, teniendo mucho cuidado de que no exista sobrecalentamiento local de la muestra y que el punto máximo de temperatura no sea mayor de 69.4°C por encima del punto de ablandamiento esperado. Se agita la muestra durante el período de calentamiento, para evitar la incorporación de burbujas de aire. Se vierten 50 ml de la muestra sobre cada uno de los recipientes, para ello se deberá calcular, a partir del peso específico a 25/25°C, el peso del material equivalente a 50 ml (+/-0,5 gr.). Se dejan enfriar las muestras a temperatura ambiente y se vuelven a pesar las muestras con una precisión de 0,001 g.

3.3 Caracterización Física y Mecánica

Con el fin de comparar los resultados obtenidos del asfalto original y cada uno de los modificados fueron desarrolladas las pruebas físicas de penetración y esfuerzo deformación a una temperatura de 25°C.

3.3.1 Penetración (ASTM D5)

3.3.1.1 Introducción

El ensayo de penetración es un método que refleja la consistencia del asfalto a 25° C, que es, una temperatura media. Esta prueba consiste en permitir que una aguja de dimensiones especificadas cargada con 100 g penetre en el material durante 5 s. Se determina la penetración por la profundidad a que la aguja se hunde en el asfalto, medida en decimas de milímetro (Álvarez, 2018).

La prueba de penetración es otro método para cuantificar la consistencia del asfalto, también utilizada como guía y para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos. Los ensayos de penetración fueron utilizados dentro de las primeras metodologías de clasificación de asfaltos y aun se siguen utilizando.

La penetración y la consistencia son inversamente proporcionales; es decir, cuanto mayor es la penetración, más blando es el asfalto.

Según la norma AASHTO T-49 (2015), el objetivo de este método de penetración, es determinar la penetración de materiales bituminosos semisólido o sólidos, empleando los siguientes equipos: penetrómetro con aguja, sobre superficie nivelada; y molde de la muestra de penetración. El procedimiento para esta prueba consiste en calentar el material, para ser vaciado en el molde de penetración; dejándolo enfriar hasta mantener una temperatura constante de 25°C. Se coloca el espécimen debajo de la aguja (figura 15), efectuando varios ensayos de penetración, en puntos separados 10 mm.

3.3.1.2 Procedimiento

Se coloca una muestra de cada asfalto modificado en moldes como los que aparecen en la (figura 7. c), una vez que las muestras tengan consistencia sólida, se desmolda cada una de ellas para luego ser colocada en el equipo para someterla a una carga con una aguja estandarizada de 100 gramos durante 5 segundos a 25 °C y como particularidad de esta prueba cuando fue realizada existía una humedad relativa de 48%.

Para la realización de prueba, se utilizó una máquina marca Zwick Roell modelo Z005 con una capacidad de carga máxima de 5000 N (figura 7 a-b) del LACAM del CAFATA, UNAM Campus Juriquilla. Se realizaron 2 penetraciones para cada uno de los testigos conformados con los asfaltos modificados, cuidando las condiciones especificadas anteriormente.

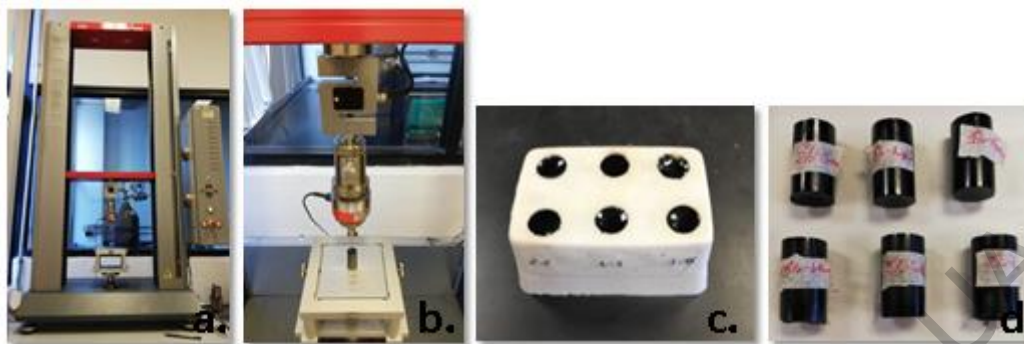


Figura 7. a.-b. Equipo para la realización del ensayo, c. Moldes para conformar muestras, d. Muestras elaboradas

3.3.2 Prueba Esfuerzo-Deformación (ASTM D638-10)

3.3.2.1 Introducción

La medición del esfuerzo-deformación se realizó de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM D638-10 “Método de Prueba Estándar para Determinar las Propiedades de Tracción de los plásticos”, la cual mide la deformación por tracción de un ligante asfáltico a baja temperatura, así como el comportamiento de los ligantes como si estos estuvieran expuestos a los procesos de mezclado en caliente.

Las muestras son en forma de “hueso de perro” (figura 8 b-c) y se elaboran vertiendo el asfalto en un molde de silicón. Una vez desmoldados los especímenes se procede a realizar la prueba colocando la muestra en la máquina y tensionándola a velocidad constante.

La deformación específica (ϵ_f) de la muestra en el momento de la falla es el cambio de longitud (ΔL) dividido por la longitud efectiva. Para esta prueba, la falla se determina por la tensión en el momento de máximo valor de la carga y no necesariamente por la carga cuando el espécimen falla. El esfuerzo de falla σ_f es la

carga de rotura dividida por el área de la sección transversal. La especificación de SUPERPAVE indica una deformación específica mínima en la falla del 1%.

3.3.2.2 Procedimiento

Se colocó el asfalto caliente en los moldes de silicón con forma de “hueso de perro” y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se realizaron 5 especímenes de cada uno de los asfaltos modificados según su porcentaje de incorporación a la mezcla 1%, 2% y 3% y combinado con cada uno de los tiempos de molido del material 1min, 5min, 10min y 20min, dando lugar a 20 muestras para cada porcentaje de incorporación, y adicionalmente 5 muestras del asfalto base completando un total de 65 espécimen a ensayar.

Se desmoldaron los especímenes y se midieron con ayuda de un vernier, tomándose las medidas de ancho y espesor de cada una de las muestras y se obtuvieron sus promedios. Posteriormente se colocaron las muestras en el equipo de tracción (figura 8a) y se inició la prueba con una velocidad de 50 mm/min con una carga inicial de 0.05 N.

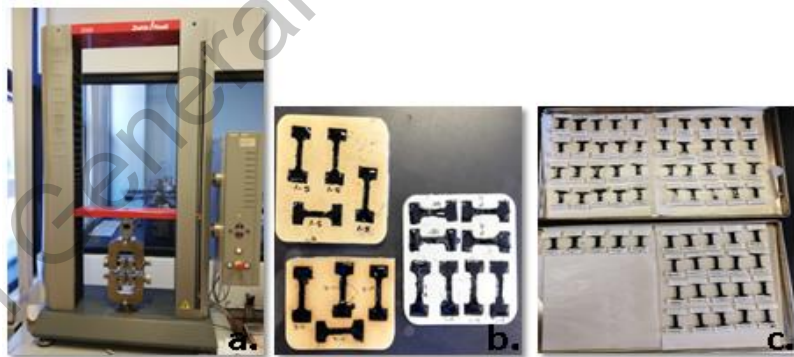


Figura 8. a. Equipo de tracción, b-c Moldes de “hueso de perro” del LACAM del CAFATA, UNAM Campus Juriquilla.

Se reportaron los resultados obtenidos de la máquina y las dimensiones de cada espécimen en una tabla.

3.4 Caracterización Reológica

Con el fin de obtener una herramienta para discriminar asfaltos con propiedades y comportamientos diferentes, Elizondo *et al.*, (2010), utilizaron las propiedades reológicas para caracterizar asfaltos modificados con biomateriales. Tales ensayos reológicos se encuentran especificados tanto en el reporte NCHRP-459 como en las normas AAHSTO para asfaltos modificados. El equipo empleado es el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), para medir la viscosidad y analizar el comportamiento elástico del cemento asfáltico a temperaturas de servicio tanto medias como altas. Además, con este equipo se puede medir el módulo de corte complejo G^* y el ángulo de fase δ del cemento asfáltico, a la temperatura y frecuencia de carga deseada, según AASHTO T315. Al respecto, es importante destacar que las propiedades reológicas del asfalto, dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo (Cárdenas y Fonseca, 2009).

El asfalto tiene un comportamiento que depende tanto del tiempo como de la temperatura, por lo que se debe realizar la reología de los asfaltos a dichas muestras de asfalto modificado. Como primera instancia se realizó la prueba de viscosidad rotacional y finalmente la prueba de reómetro de corte dinámico.

3.4.1 Prueba de Viscosidad Rotacional (ASTM D4402-12)

3.4.1.1 Introducción

Los fluidos son sistemas de partículas mantenidas juntas mediante sus propias fuerzas o por las fuerzas de fijación que ejercen las paredes de un contenedor. En el movimiento de los fluidos, la viscosidad juega un papel fundamental, su transporte genera fuerzas tangenciales tan grandes que algunas veces el movimiento se lleva a cabo con gran dificultad. Esto sucede por ejemplo con aceites muy pesados. Por

el contrario, otras veces estas fuerzas son muy pequeñas y el líquido fluye entonces fácilmente como sucede con el agua. Este “grado de fluidez” se caracteriza por un coeficiente típico de cada sustancia que se llama coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica.

Un sólido amorfo no es en realidad más que un líquido cuya viscosidad dinámica es enormemente grande. “Las mediciones de viscosidad se utilizan en la industria para apoyar los cálculos de flujo de líquidos, la determinación de coeficientes de transferencia de calor y en el control de procesos químicos. El valor de viscosidad es un punto de referencia exacto en la formulación de muchos materiales, optimizando la reproducción de la consistencia de un lote a otro. Como indicador cuantitativo de calidad, la viscosidad se utiliza en la industria de aceites, la petroquímica, la de alimentos, la farmacéutica, la textil y de pinturas, entre otras (Ohanian, 2009).

Existen diversos instrumentos para determinar esta propiedad, de los métodos más conocidos se tienen:

- Los que miden el flujo del líquido a través de tubos, como los viscosímetros capilares, los más comunes son el de Ostwald, el Cannon-Fenske y el Ubbelohde.
- Los viscosímetros rotacionales como el de Brookfield (figura 9 a-b).

El objetivo de este ensayo es medir las propiedades del asfalto a altas temperaturas, para determinar las características de mezclado y compactación. El asfalto es vaciado en una cámara de calentamiento (termocelda), un spindle estándar es insertado en el soporte rotatorio. La fuerza requerida para rotar el spindle es la medida de la viscosidad. En el laboratorio o en campo para determinar las

temperaturas de mezclado y compactación, además de asegurar que no se presenten problemas de manejo y bombeo.

La bibliografía hace referencia que no debe superar los 3 Pa·s, para una temperatura de 135 ° C y 180 ° C y dicho torque está relacionado con la viscosidad que es determinada por el viscosímetro automáticamente.



Figura 9. a) y b) Viscosímetro Rotacional Brookfield, c- Contenedor del Viscosímetro

3.4.1.2 Procedimiento

La muestra se calienta previamente en una estufa evitando exceder los 100 gramos y a una temperatura de 150°C, el viscosímetro debe de ser colocado y nivelado en una mesa correctamente para la realización de la prueba.

Se calienta el conjunto a una temperatura de 110°C. Luego de hora y media, se coloca la muestra de asfalto aproximadamente de 10 gramos en el contenedor del viscosímetro (figura 9c) y se sumerge la geometría en el recipiente tratando de que la aguja se cubra completamente de asfalto.

Se centra la aguja y se espera hasta que la temperatura del contenedor, la geometría y la muestra se estabilicen.

Seguidamente de ese tiempo de espera se enciende el motor del viscosímetro y se deja ahí por 5 min, transcurrido ese tiempo se corre el software para obtener la curva de viscosidad-temperatura, finalmente se apaga el motor.

3.4.2 Reómetro de Corte Dinámico (ASTM D7175-08)

3.4.2.1 Introducción

Reómetro de Corte Dinámico (DSR) (figura 10 a-b)- Es usado para ensayar ligantes asfálticos y medir sus propiedades reológicas, incluyendo el módulo complejo de corte (G^* pronunciado como “G estrella”) y el ángulo de fase (δ letra griega “delta”) en el amplio rango de temperaturas. Para el asfalto virgen y para el residuo obtenido por el horno rotatorio de la película delgada, se utilizan para ensayar dichos asfaltos los platos paralelos de 25mm y con una separación entre ellos de 1000 micras, para el asfalto obtenido después del envejecimiento en PAV se utilizan platos paralelos de 8mm y una separación entre ellos de 2.0mm. La deformación permanente se controla limitando el valor mínimo de ($G^*/\text{seno } \delta$) a 1.00 kPa (antes del envejecimiento) y a 2.2 kPa (luego de envejecido en RTFO). El agrietamiento por fatiga es controlado limitando el valor de ($G^* \cdot \text{seno } \delta$) del asfalto envejecido en PAV a un máximo de 5000 kPa

El ensayo de reología con DSR es utilizado para evaluar el comportamiento visco-elástico que experimenta el ligante a intermedias y altas temperaturas de servicio. En el DSR se miden dos parámetros fundamentales: el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). G^* puede ser considerado como la resistencia del concreto asfáltico a deformarse por esfuerzos de corte repetidos, mientras que δ es el desfase entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte resultante durante el ensayo. Entre mayor sea δ , el material es más viscoso. Un material que experimente un comportamiento totalmente elástico experimenta un $\delta=0^\circ$, mientras que uno puramente viscoso presenta $\delta=90^\circ$, G^* y δ son utilizados para intentar

predecir la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga. Con el fin de evitar ahuellamiento en una mezcla asfáltica, el ligante asfáltico debe ser lo suficientemente rígido (bajo corte) y elástico, por lo tanto, la relación $G^*/\sin\delta$ debe ser grande. $G^*/\sin\delta$ debe ser como mínimo 1 kPa y 2.2 kPa para un ligante sin envejecimiento en RTFO (Rolling Thin Film Oven Test) y con este respectivamente. Para evitar agrietamiento por fatiga, la mezcla debe ser elástica pero no tan rígida hasta que se fragilice (la rigidez debe ser la suficiente para que la mezcla experimente un comportamiento dúctil); por lo tanto, $G^*\sin\delta$ debe ser mínima. Como máximo se admite $G^*\sin\delta=5000$ kPa.

Los valores de G^* y δ en los asfaltos dependen en gran medida de la temperatura y frecuencia de carga. A altas temperaturas los asfaltos se comportan como fluidos viscosos. Por otro lado, a temperaturas muy bajas los asfaltos se comportan como sólidos elásticos. A las temperaturas en que la mayoría de los pavimentos soportan el tráfico, los asfaltos se comportan simultáneamente como líquidos viscosos y sólidos elásticos. Bajo carga, una parte de la deformación es elástica y otra viscosa. Por ello el asfalto es definido como un material viscoelástico.

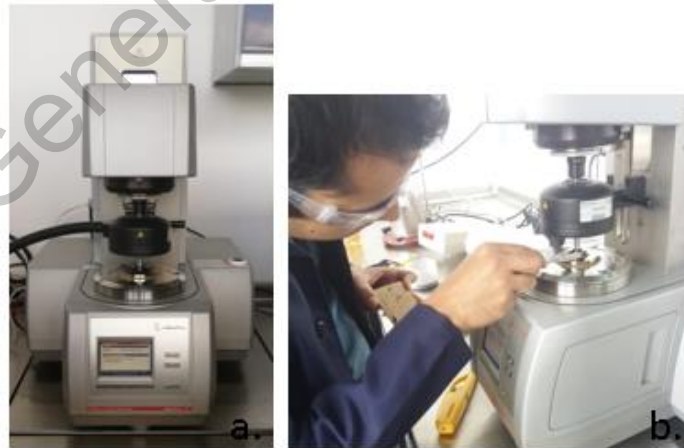


Figura 10. Reómetro de Corte Dinámico

3.4.2.2 Procedimiento

Para la realización de este ensayo es necesario primeramente contar con las mezclas tanto naturales como modificadas. Posteriormente hay que lograr una consistencia fluida en las mezclas para poder elaborar los especímenes que se ingresan al equipo, para ello nos apoyamos en el horno para utilizar una muestra del material de unos 0.5 g que será vertida en moldes de silicón.

Una vez limpio, calibrado y con la temperatura adecuada en el equipo, se procedió a la colocación de la pastilla, posteriormente se inició la operación a una temperatura fijada de 64°C ya que en temperaturas mayores a los 70°C todas las combinaciones de mezclas de porcentaje de adición del biomaterial y tiempos de molido, fallaron al ser ensayadas tanto antes como después del proceso de envejecimiento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Preparación de las muestras

Inicialmente se presenta el diseño experimental de la investigación en la tabla 1, donde se le asigna a cada muestra una clave, ésta queda ajustada según el porcentaje de incorporación del biomaterial al asfalto modificado (AM) y el tiempo de molido. También se muestra el peso en gramos de cada muestra de asfalto base que fue modificada, peso que se encuentra en el orden de los 150 g, y la cantidad de biomaterial que se le incorporó, según los porcentajes asignados a cada muestra. Por último se presentan los ensayos que se les realizaron a las muestras modificadas y el número de repeticiones para cada caso.

Este orden se retoma para los ensayos luego de los asfaltos envejecidos en RTFO, con la diferencia que la cantidad de material recuperada está en el orden de los 15 g, ya que depende del grado de experiencia del operador.

Tabla 1. Diseño experimental. (Fuente: Elaboración propia)

No. MUESTRA	CLAVE	BIOMATERIAL (gr)	ASFALTO BASE (gr)	DESCRIPCIÓN	PENETRACIÓN	PRUEBA ESFUERZO-DEFORMACIÓN	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA	MICROSCOPIA ELECTRONICA DE TRANSMISIÓN	REOMETRO	VISCOSIDAD ROTACIONAL
ENSAYOS ANTES DEL RTFO										
1	AM-1% 1min	1.45	145.7	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 1min de molido	3	3	1	1	1	1
2	AM-2% 1min	2.97	148.4	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 1min de molido	3	3	1	1	1	1
3	AM-3% 1min	4.54	151.2	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 1min de molido	3	3	1	1	1	1
4	AM-1% 5min	1.52	152.3	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 5min de molido	3	3	1	1	1	1
5	AM-2% 5min	2.93	146.4	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 5min de molido	3	3	1	1	1	1
6	AM-3% 5min	4.45	148.2	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 5min de molido	3	3	1	1	1	1

7	AM-1% 10min	1.47	146.8	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 10min de molido	3	3	1	1	1	1
8	AM-2% 10min	2.95	147.3	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 10min de molido	3	3	1	1	1	1
9	AM-3% 10min	4.46	148.5	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 10min de molido	3	3	1	1	1	1
10	AM-1% 20min	1.48	147.5	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 20min de molido	3	3	1	1	1	1
11	AM-2% 20min	2.98	149.1	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 20min de molido	3	3	1	1	1	1
12	AM-3% 20min	4.40	146.8	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 20min de molido	3	3	1	1	1	1
13	Asfalto Base	-	150.3	Asfalto Base sin modificar	3	3	1	1	1	1
ENSAYOS DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO DE LAS MUESTRAS EN RTFO										
14	AM-1% 1min	0.145	14.5	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 1min de molido	3	3	-	-	1	1
15	AM-2% 1min	0.3	15	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 1min de molido	3	3	-	-	1	1
16	AM-3% 1min	0.426	14.2	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 1min de molido	3	3	-	-	1	1
17	AM-1% 5min	0.13	13	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 5min de molido	3	3	-	-	1	1
18	AM-2% 5min	0.264	13.2	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 5min de molido	3	3	-	-	1	1
19	AM-3% 5min	0.438	14.6	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 5min de molido	3	3	-	-	1	1
20	AM-1% 10min	0.148	14.8	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 10min de molido	3	3	-	-	1	1
21	AM-2% 10min	0.262	13.1	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 10min de molido	3	3	-	-	1	1
22	AM-3% 10min	0.435	14.5	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 10min de molido	3	3	-	-	1	1
23	AM-1% 20min	0.128	12.8	Asfalto Modificado con Biomaterial 1% 20min de molido	3	3	-	-	1	1
24	AM-2% 20min	0.262	13.1	Asfalto Modificado con Biomaterial 2% 20min de molido	3	3	-	-	1	1
25	AM-3% 20min	0.447	14.9	Asfalto Modificado con Biomaterial 3% 20min de molido	3	3	-	-	1	1
26	Asfalto Base	-	15.1	Asfalto Base sin modificar	3	3	-	-	1	1
TOTAL DE PRUEBAS					78	78	13	13	26	26

4.2 Caracterización Química y Morfológica de las mezclas.

En esta sección son presentados los resultados obtenidos ante las pruebas químicas y morfológicas de los asfaltos modificados con el biomaterial en estudio, en la búsqueda si realmente se produce la incorporación en la mezcla.

4.2.1 Espectroscopia Infrarroja

Los resultados del análisis espectroscópico, se presentan en forma de gráfica de la frecuencia contra la intensidad de energía absorbida; como primer paso fue realizado el ensayo para el asfalto base y luego para el biomaterial utilizado en este estudio, café, con el objetivo de identificar las bandas de absorción características en estos materiales, de forma independiente.

En la figura 23 se puede detallar las bandas características del asfalto base, de acuerdo a la literatura el número de onda de aproximadamente 1373 cm^{-1} , correspondiente a una banda característica de C-H, y la banda 1459 cm^{-1} aproximadamente causada por los átomos de hidrógeno y carbono. Para los análisis de los espectros de las muestras de asfalto modificado se utilizó la banda 1373 cm^{-1} para referencia del asfalto, debido a que esta banda no se aprecia en los espectros del café en sus diferentes grados de molido, los cuales se mostrarán a continuación, asegurando que el grupo funcional que produce dicha banda solo se encuentra presente en el material asfáltico.

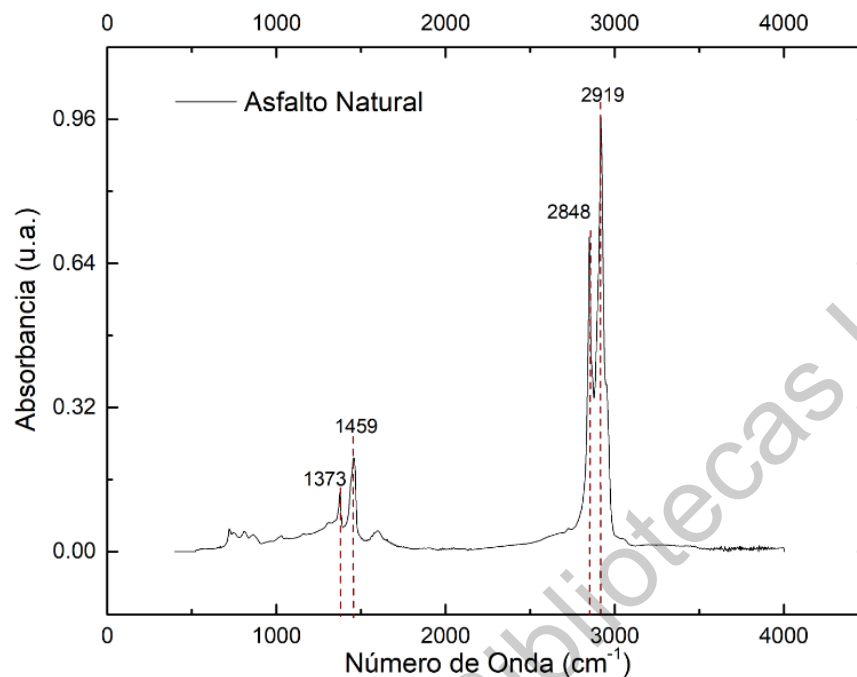


Figura 11. Espectro del asfalto base o natural sin modificar (Fuente elaboración propia)

Para el espectro del café en sus diferentes grados de molido, figura 12, presenta grupos funcionales característicos, los cuales no aparecen en el asfalto base, estos están entre las bandas de absorción que se enmarcan en el intervalo de 1650 a 1750 cm^{-1} correspondientes al enlace $\text{C}=\text{O}$ de los grupos carboxílicos, esto se corrobora con la literatura e investigaciones precedentes.

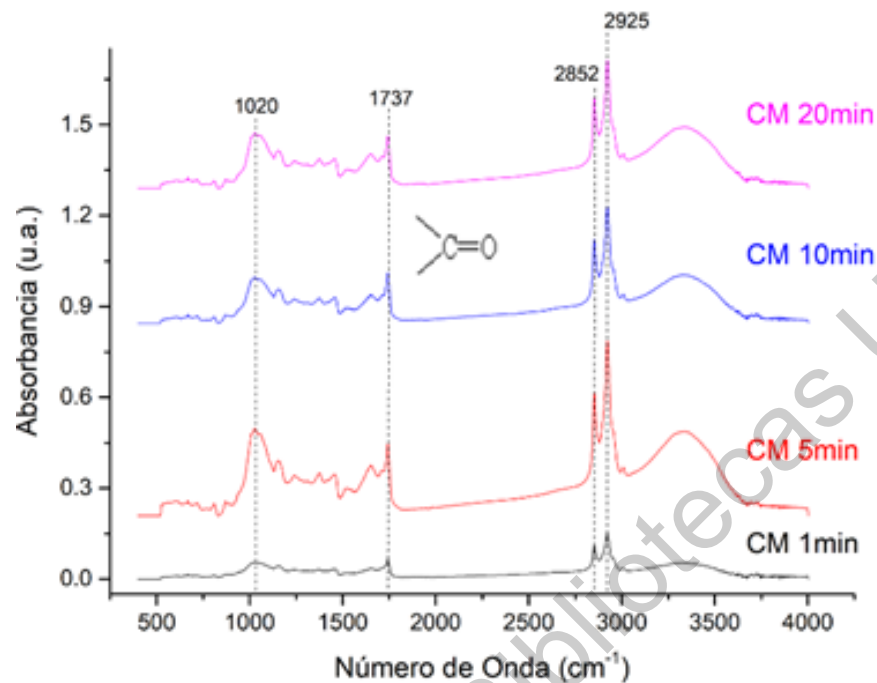


Figura 12. Espectro del biomaterial (café) para sus diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)

La banda más significativa en los espectros del café es 1737 cm^{-1} según muestra la figura 12, ésta será tomada como base para detectar la presencia del biomaterial en las mezclas. También es importante señalar que, en estudios precedentes realizados en Colombia, uno de los principales productores del grano a nivel internacional, se manifiesta esta banda en espectros obtenidos para determinar su pureza.

Identificadas las bandas de los materiales tanto el asfalto como su modificador café, se analizó cada una de las modificaciones en sus diferentes porcentajes y grados de molido del material, nuestras variables principales en el estudio, en la búsqueda de sus grupos funcionales de forma gráfica podremos determinar si se manifiestan

las bandas en la modificación, dándonos una idea de la condición química de la mezcla.

En la figura 13 se presentan los espectros del asfalto modificado con el 1% de incorporación del biomaterial y sus diferentes grados de molido, señalando las bandas de interés en las mezclas, evidenciando que el material se encuentra modificado.

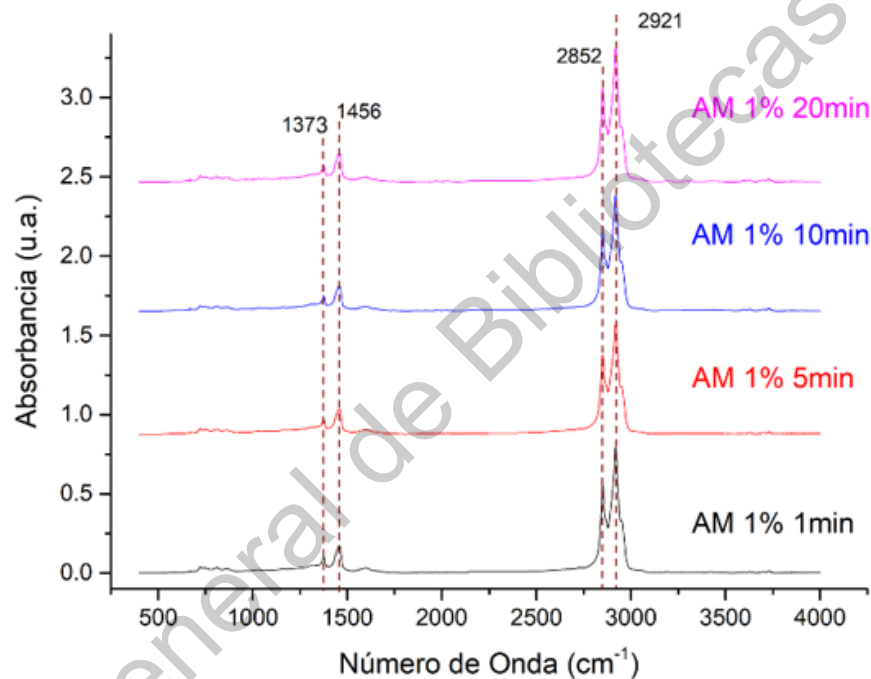


Figura 13. Espectro IR de absorbancia del biomaterial para mezclas con concentración 1% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)

De igual forma, en la figura 14 se tienen los espectros del asfalto modificado en las concentraciones de 2%.

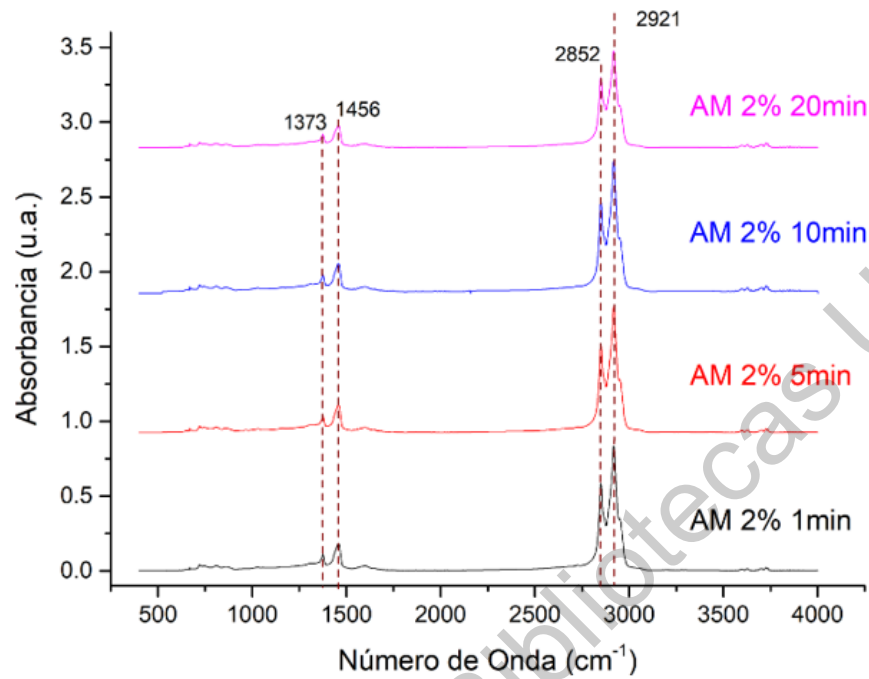


Figura 14. Espectro IR de absorbancia del biomaterial para mezclas con concentración 2% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)

Así en la figura 15, se presentan los espectros del asfalto modificado en las concentraciones de 3%.

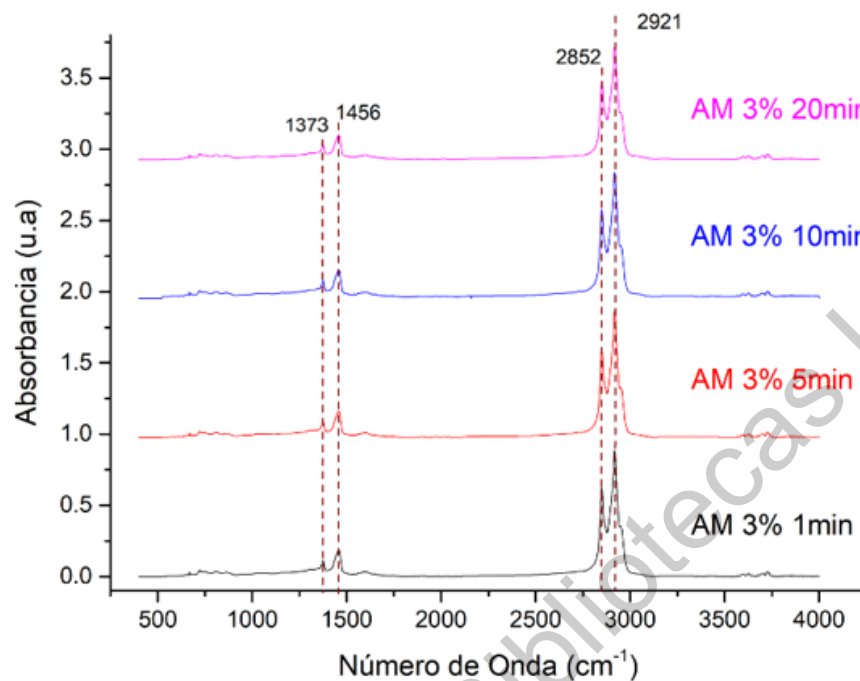


Figura 15. Espectro IR de absorbancia del biomaterial para mezclas con concentración 3% y diferentes tiempos de molido. (Fuente elaboración propia)

La presencia del asfalto es muy clara en todas las mezclas, la banda 1373 cm^{-1} se evidencia con claridad para los diferentes porcentajes de incorporación y tiempos de molido, no siendo así con la presencia del biomaterial donde se define con muy poca intensidad su banda característica 1737 cm^{-1} incluso en las aplicaciones de escala que fue realizada para dos mezclas de excelente comportamiento ante el resto de los ensayos $3\% 5\text{min}$ y $2\% 5\text{min}$ se intentaron superponer, y su comportamiento es casi idéntico, atribuyéndole esta situación al porcentaje de incorporación que no es de los más altos, así se muestra en la figura 16.

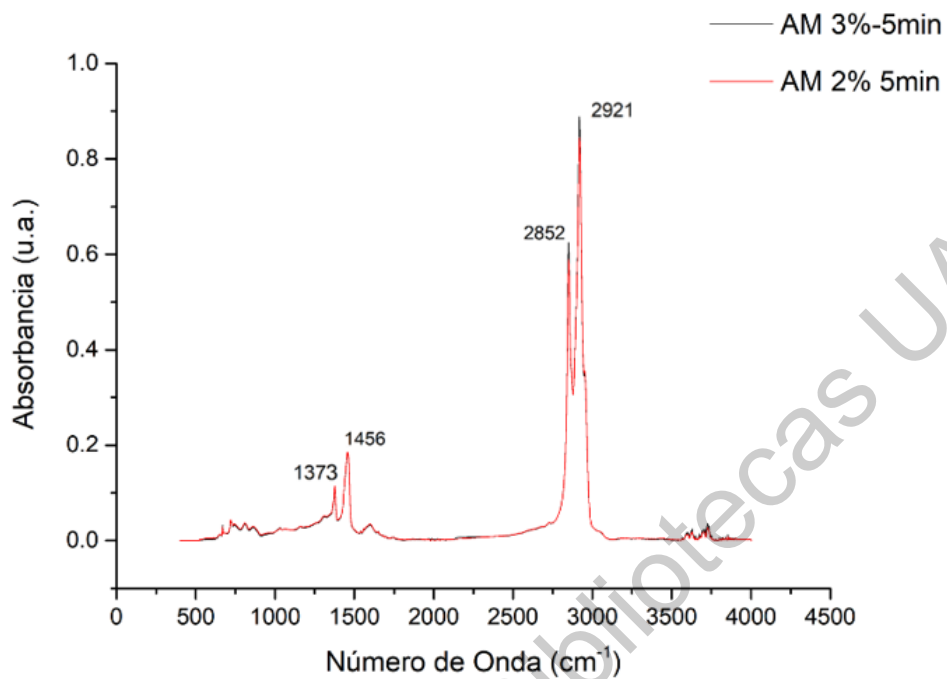


Figura 16. Espectro IR de absorbancia aplicación de escala de las muestras. (Fuente elaboración propia)

4.2.2 Microscopia Electrónica de Transmisión

En el desarrollo de la investigación se logra realizar una observación del asfalto base figura 17 esta puede ser muy útil para la comparación de las imágenes brindadas por el microscopio electrónico, así como la observación del biomaterial bajo la misma técnica, descartando este por la no observación de sus partículas en el asfalto base.

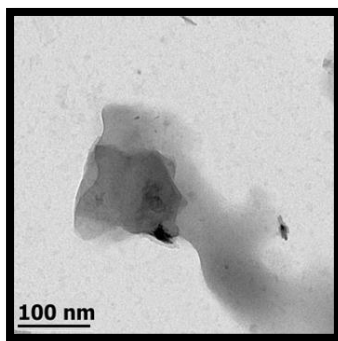


Figura 17. Observación del Asfalto Base sin modificar EKBE 64-22

Como se muestra es una observación muy clara a 100 nm con bajos índices de contaminación que puede ser nuestro patrón comparativo para la detección de partículas ajenas a las mezclas modificadas.

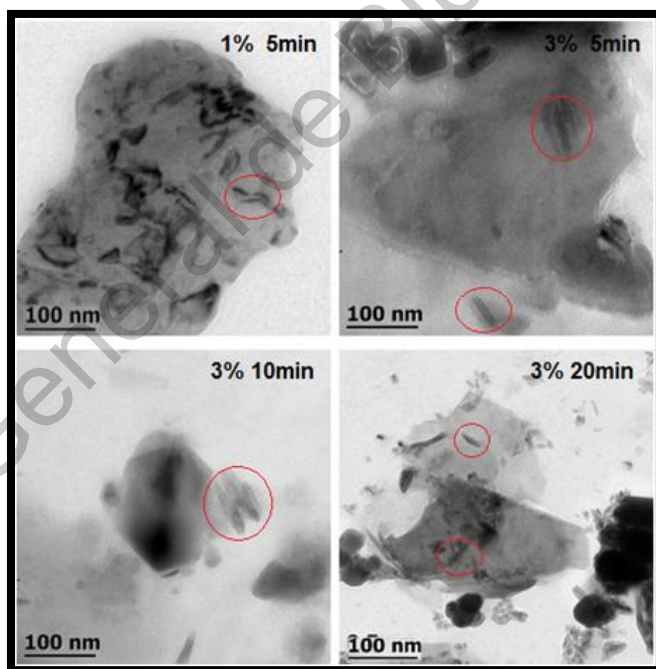


Figura 18. Microfotografía del Asfalto modificado EKBE 64-22 con incorporaciones y tiempos de molido múltiples.

En la figura 18 se observan las microfotografías a bajas concentraciones del biomaterial a 100 nm, en la búsqueda de calidad en la observación. Como se puede apreciar su morfología es diferente al asfalto base que nos presenta la investigación, demostrando la presencia del biomaterial. La primera consideración que podemos tomar es que la morfología del asfalto original es diferente a los modificados y que estos también varían entre ellos de acuerdo al porcentaje de incorporación del material y el tiempo de mezclado, haciéndolo dos variables determinantes en el estudio. En un estudio de la inversión de fases, podemos señalar que desde la concentración más baja de incorporación 1% se denota un intercambio de fase del sistema asfalto/ biomaterial, observándose una fase continua entre ellos.

En las incorporaciones del 3% son las que se presentan con mayor frecuencia las partículas de café que son detectadas en las microfotografías con una forma helicoidal bien definida, ya que son ajenas a la muestra de asfalto base con que se cuenta, pero en la bibliografía especializada no fueron encontradas microscopias realizadas al café molido con anterioridad, solo la descripción de su forma en las observaciones precedentes.

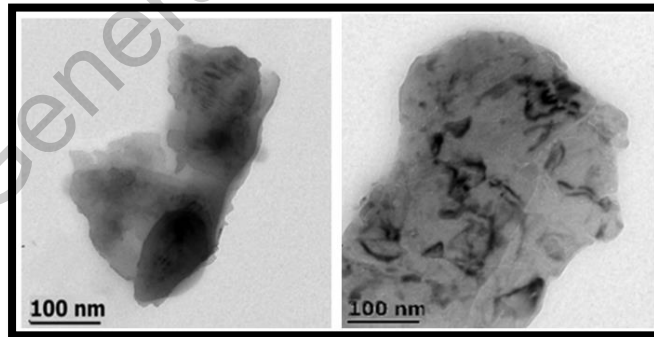


Figura 19. Microfotografía del Asfalto modificado con una incorporación del 1% y un tiempo de molido de 5 min.

En las primeras observaciones (ver figura 19) no se encuentran presente con regularidad propio de un porcentaje de 1% prácticamente imperceptible en la mezcla. Comienza a notarse su presencia en la adición del 3% pero con una presencia discreta para 5 min de molido.

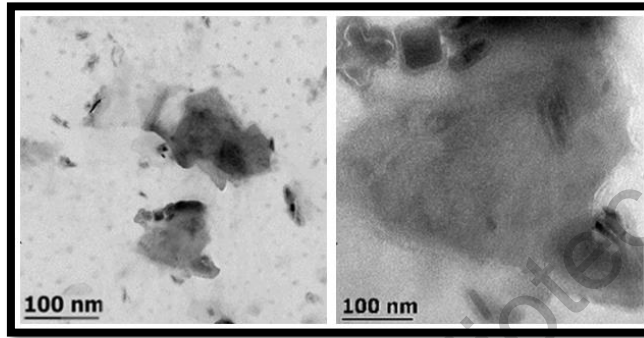


Figura 20. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 5 min.

Para 3% 5 min la presencia es mucho mayor figura 20 y realmente la heterogeneidad de la mezcla se aprecia con mejor calidad. Tentativamente se puede plantear que ante la microscopia electrónica es la mezcla con mejores características.

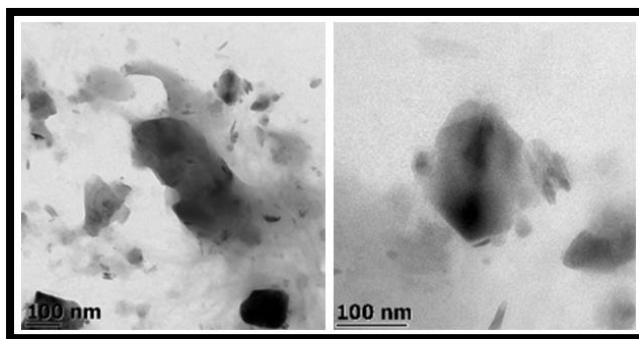


Figura 21. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 10 min.

Para 3% 20min se aprecian estas partículas a escalas menores con mejor calidad, atribuido a que el tamaño de la partícula es menor debido al tiempo de molido, pero se encuentran en mayor porcentaje por unidad de área figura 21.

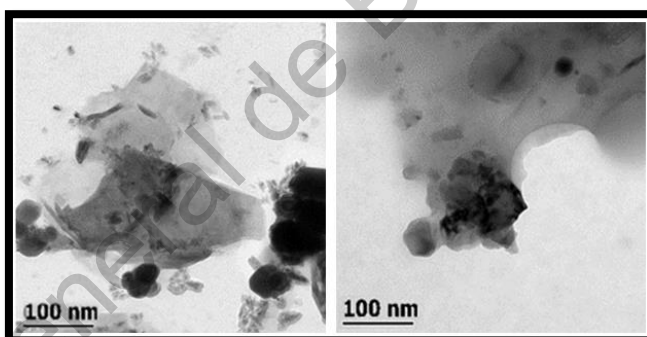


Figura 22. Microfotografía del asfalto modificado con una incorporación del 3% y un tiempo de molido de 20min.

Para 3% 20min el tamaño de partícula también es muy pequeño y ya conocemos que esto ayuda mucho a las observaciones por su distribución en mayor cantidad de área del número de partículas, así que su similitud es próxima a los resultados del 3% 5min donde la observación de las partículas es muy clara, siempre que la nitidez de la imagen lo permite.

4.3 Resultados de la Caracterización Mecánica

4.3.1 Penetración

Para el desarrollo de la prueba a cada espécimen se le hicieron tres penetraciones tanto antes del envejecimiento en el horno de película delgada rotacional (RTFO) como después de este proceso, para la realización de este ensayo en el laboratorio se encontraban unas condiciones de temperatura de 25 °C como indica la norma ASTM D5 que debe de ser ensayados los especímenes y una humedad relativa del 48%.

Para una mejor interpretación de los resultados se calcula el promedio de estas penetraciones. Esto es válido por las mínimas variaciones que existen en el área de contacto de la aguja, los cilindros tienen un diámetro en el orden de los 13 mm y las distancias entre los puntos donde se realiza las penetraciones no exceden los 4 mm, como resultado de ello las variaciones entre los valores son muy pequeñas.(figura 23).



Figura 23. Penetración de los asfaltos modificados con biomaterial (café). Valores promedios antes del RTFO.

Una prueba con baja penetración tendría una temperatura de ablandamiento alta lo que significa un incremento en la rigidez del material. Como podemos observar en la gráfica, las modificaciones del 1% en su mayoría se mantienen estables ante la rigidez de la mezcla base. Para el ensayo del 2% de incorporación, ocurre lo contrario; en dos de los elementos se produce una disminución de la rigidez de la mezcla, excepto en la modificación con 1min de molido y de 5min que ganan en rigidez. Dentro de estos especímenes se encuentra la muestra que menor temperatura de ablandamiento tendría que sería la modificación con el material de menor tamaño de partícula, sometido a 20 min de molido, con una penetración 28.75 dmm y excediendo al asfalto natural (base) en un 9.39%. Para la modificación del 3% sus resultados ganan rigidez excepto la modificación con 5min de molido que se encuentra muy cerca de las características del asfalto base. En resumen, para todas las muestras los mejores resultados encontrados con alta penetración y con una disminución de la rigidez del material son las modificaciones del 2%-20min con 28.75dmm y 3%-10min con un valor de 28.1dmm, la mayor ganancia de rigidez es para la muestra 2%-1min con una penetración de 23.45 dmm.

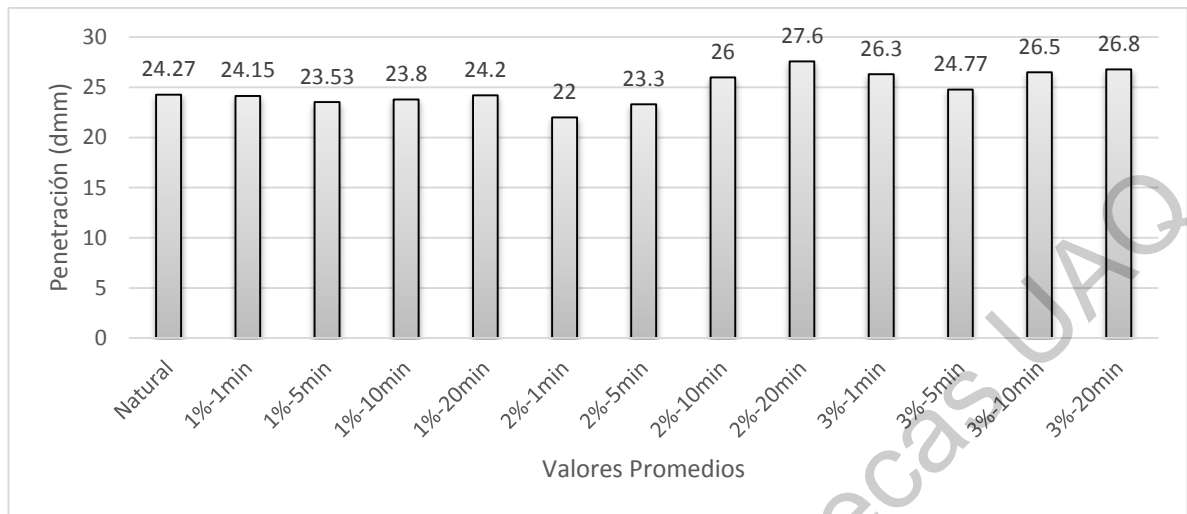


Figura 24. Penetración de los asfaltos modificados con biomaterial (café). Valores promedios después del RTFO.

Una vez envejecidas las mezclas su penetración es menor, debido al proceso que fue sometida las modificaciones y el asfalto base en el horno de película delgada rotacional (RTFO). La comparativas entre ambos gráficos, antes y después del proceso de envejecimiento, presenta una similitud, los valores distan entre ellos pero el comportamiento de las gráficas, son semejantes (véase figuras 23 y 24).

Al comparar los resultados de los asfaltos con la modificación, respecto a la muestra base, que no posee incorporación del biomaterial, antes del RTFO, se detecta un caso particular que debe hacerse mención, las muestras con las adiciones 2%-10min, 2%-20min, 3%-1min, 3%-5min, 3%-10min y 3%-20min poseen mayores valores de penetración que el asfaltos base, un resultado poco esperado para asfaltos modificados (véase figura 23).

La penetración para los ensayos posteriores al tratamiento en RTFO con porcentajes del 2% 1min, de 2% 20min y 3% 20min se presenta con valores de 22dmm, 27.6dmm y 26.8dmm respectivamente, sus similares antes del

envejecimiento tienen un valor de 23.45dmm, 28.75dmm, y 28dmm distando su resta modular en 1.45dmm, 1.15dmm, 1.2dmm respectivamente. Las muestras bases con valores de 24.27dmm y 26.05dmm distan entre ellos en 1.78 dmm demostrando una influencia menor del envejecimiento luego del RTFO con la incorporación (véase figura 25).

Dirección General de Bibliotecas UAQ

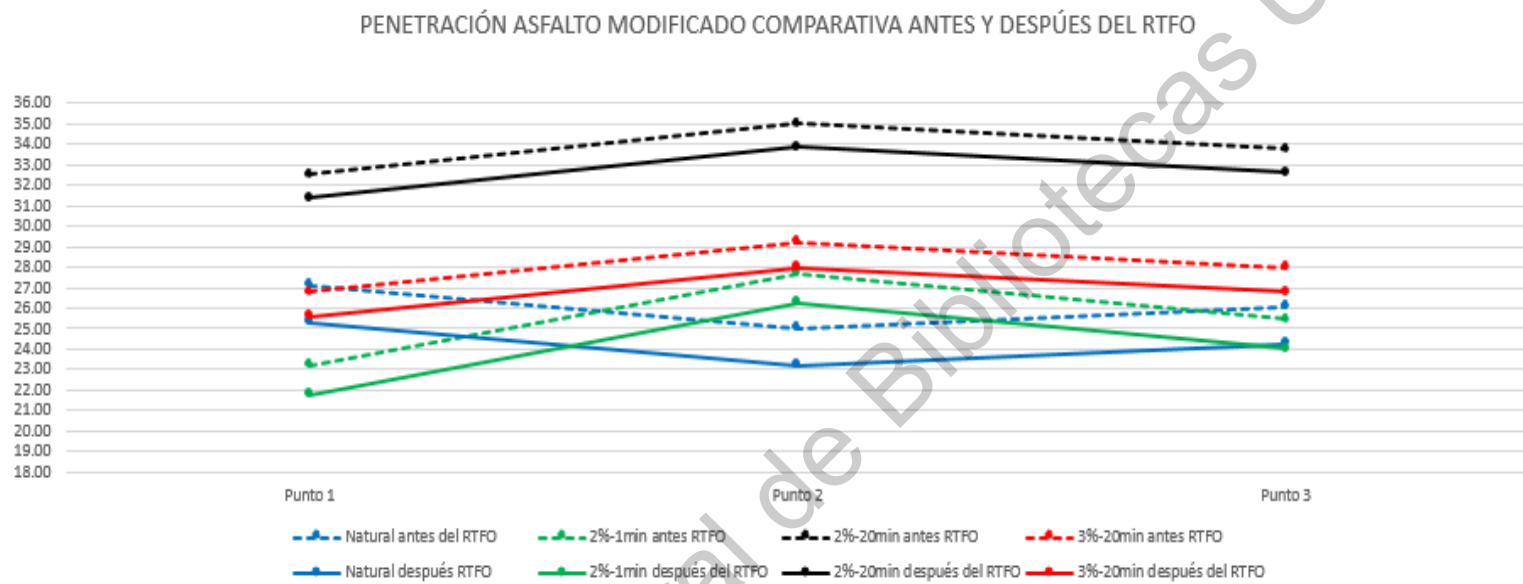


Figura 25. Resultados comparativos de penetración del asfalto modificado antes y después del envejecimientos en RTFO.

4.3.2 Prueba Esfuerzo-Deformación

Se presenta en la tabla 2 los módulos de elasticidad promedio, de cada muestra de asfalto modificado en sus porcentajes de biomaterial y el tiempo de molido.

Con los datos obtenidos de la máquina de prueba, se construyó una gráfica Esfuerzo-Deformación de cada una de las muestras ensayadas. Estas gráficas son parte de los resultados que brinda el programa del equipo y se muestran en el anexo 7.3.

De la tabla 2 se puede decir que no todos los asfaltos modificados presentan mayor módulo elástico promedio que el asfalto original, un comportamiento esperado ya que se está adicionando un nuevo material a la mezcla, siendo los mayores módulos el asfalto de 1% - 1min de molido con un valor de 1.09 MPa, el de 3% - 5min con el mayor valor de todos con 1.21MPa, 3% - 10min con 0.94MPa y el de 3% - 20min con 1.09MPa, resumiendo que las adiciones de 3% son las que mejor respuesta tienen ante el módulo de elasticidad del material, realmente un valor que merece más atención en el estudio pues ante la sola adición incrementa el valor de sus propiedades elásticas, así mismo observamos que no existe tanta variación en los datos obtenidos con la máquina. Al analizar los resultados de las restas modulares obtenidos antes y después del RTFO, también son considerables los resultados siguientes: la resta modular del asfalto base es de 1.23MPa y para las modificaciones 1% 20min, 2% 20min y 3% 20min son 0.72MPa, 0.81MPa y 0.55MPa respectivamente, la adición es capaz de mantener también los módulos de elasticidad más próximos a su valor antes de ser envejecidos y en comparativa con el asfalto base.

Tabla 2. Módulos de elasticidad de las mezclas de asfalto modificado con biomaterial (café) antes del RTFO. (Fuente elaboración propia)

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)			
Modificador	Tiempo Molido (min)	Media	Asfalto Natural
1%	1	1.09	0,92
	5	0.88	
	10	0.39	
	20	0.44	
2%	1	0.60	0,92
	5	0.29	
	10	0.52	
	20	0.47	
3%	1	0.50	0,92
	5	1.21	
	10	0.94	
	20	1.09	

Tabla 3. Módulos de elasticidad de las mezclas de asfalto modificado con biomaterial (café) después del RTFO. (Fuente elaboración propia)

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)			
Modificador	Tiempo Molido (min)	Media	Asfalto Natural
1%	1	2.11	2.15
	5	1.24	
	10	1.83	
	20	1.16	
2%	1	1.67	2.15
	5	0.96	
	10	1.31	
	20	1.28	
3%	1	1.32	2.15
	5	0.78	
	10	2.19	
	20	1.64	

En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos luego del proceso de envejecimiento en horno de película delgada rotacional (RTFO), donde podemos apreciar un incremento en los módulos ya que la pérdida de asfaltenos y máltenos del material ante el envejecimiento dan lugar al aumento del módulo de elasticidad, pero se aprecia una disminución respecto al asfalto natural tal como haciendo viable la incorporación en las mezclas del producto, las pruebas que mejor resultados nos arrojan son las de 2% 20min y 3% 5min demostrando que dos variables imprescindibles para incorporar este aditivo son el grado de trituración del material y un control exhaustivo del porcentaje ya que no siempre los valores altos son los correctos cuando se pretende obtener mejores resultados en una magnitud específica, en este caso ante la tracción.

4.4 Reología

Hasta este punto hemos podido apreciar como el comportamiento del asfalto depende tanto del tiempo de elaboración de la mezcla como de la temperatura de tendido del material en obra así que los siguientes ensayos tienen en cuenta ambas propiedades. Comenzamos analizando la prueba de Viscosidad Rotacional Brookfield para luego analizar el Reómetro de Corte Dinámico para el análisis tanto de la viscosidad del material como la rigidez de la mezcla.

4.4.1 Viscosidad Rotacional Brookfield

El objetivo de esta técnica es analizar el comportamiento viscoso de los asfaltos de acuerdo a la temperatura además medir las propiedades del asfalto a altas temperaturas, para determinar las características de mezclado y compactación. El asfalto es vaciado en una cámara de calentamiento. Un spindle estándar es insertado en el soporte rotatorio. La fuerza requerida para rotar el spindle es la medida de la viscosidad. En el laboratorio o en campo para determinar las

temperaturas de mezclado y compactación, además de asegurar que no se presenten problemas de manejo y bombeo.

Las figuras 26, 29 y 31 presenta la curva Viscosidad-Temperatura de las muestras de asfalto con biomaterial antes del envejecimiento en el RTFO, para una mejor comprensión de los resultados fueron distribuidas en cuatro gráficas de acuerdo con su porcentaje de incorporación.

Todas estas muestras se evaluaron según su comportamiento con respecto al asfalto base, ya que la diferencia fundamental entre ellos es la presencia del biomaterial en sus diferentes porcentajes de incorporación, en esta primera etapa de estudio antes del envejecimiento.

De acuerdo a SUPERPAVE, el asfalto no debe exceder los 3000 cP a una temperatura de 135 °C para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, todas las muestras evaluadas cumplen con este requisito.

Inicialmente se contaba como información de la planta comercializadora que el asfalto base posee una Viscosidad Rotacional Brookfield a 135 °C de 484 cP valor que dista de nuestro ensayo ya que la obtenida es de 580 cP atribuyéndole este margen a las condiciones del laboratorio y el envejecimiento que puede haber sufrido el asfalto antes del ensayo.

En el anexo 7.7 se presentó el análisis para la viscosidad rotacional Brookfield, con 1min como tiempo de trituración del material, para los tres porcentajes de incorporación incluyendo el asfalto natural. Haciendo énfasis en el valor recomendado por la normativa de 135 °C, las apreciaciones y resultados no presentaron relevancia para el estudio en cuanto a este ensayo.

Como se puede apreciar, contrario a los criterios que pudieran surgir con estudios precedentes de otras adiciones a las mezclas asfálticas, el comportamiento debería estar encaminado a un producto más viscoso; y no es así, a pesar que los índices son muy bajos, solo la incorporación del café lleva a una reducción de la viscosidad del material si es comparado con la mezcla base.

La figura 26 muestra la gráfica de los valores de la tabla 4 donde se aprecia claramente que no existe una distancia sustancial de la curva de viscosidad del asfalto modificado con referencia a la del asfalto base, y en la figura 28 se grafican únicamente los valores a la temperatura de 135°C para mejor apreciación de los resultados.

La tabla 4 muestra los resultados para los valores de 5min aquí ocurre lo contrario que para 1min de molido del material, se observa un aumento de la viscosidad ante la adición del biomaterial, igual para el mismo análisis a 135°C aunque se extiende para gran parte de las temperaturas de análisis en la tabla. Se nota nuevamente una disminución de la viscosidad ante los valores de temperatura en las mezclas modificadas, éstos son mayores a los resultados anteriores con tiempos de molido del material de 1min y 5min.

Tabla 4. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO

Natural		1 % 5min		2% 5min		3% 5min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	770.00	124.90	765.00	125.10	776.00	124.93	774.00
125.33	775.00	124.88	768.00	125.25	783.00	124.93	779.00
125.20	775.00	124.73	768.00	125.20	783.00	124.75	779.00
130.13	705.00	129.85	695.00	130.08	711.00	129.95	705.00
130.40	700.00	129.98	695.00	129.88	709.00	129.98	702.00
130.55	695.00	129.88	690.00	129.78	697.00	129.80	693.00
135.08	580.00	134.70	570.00	135.20	588.00	134.85	581.00
134.83	575.00	134.55	566.00	135.05	583.00	134.75	576.00
134.88	575.00	134.50	566.00	134.80	583.00	134.48	576.00
140.33	460.00	139.95	457.00	140.15	467.00	139.95	462.00
140.05	455.00	139.78	453.00	140.00	462.00	139.80	457.00
139.83	455.00	139.55	450.00	139.75	461.00	139.60	457.00
145.18	360.00	144.93	348.00	145.08	369.00	144.65	367.00
145.23	360.00	144.78	348.00	145.03	369.00	144.45	367.00
145.00	360.00	144.53	348.00	144.83	369.00	144.45	367.00
150.20	290.00	149.75	287.00	150.00	295.00	149.88	291.00
150.08	290.00	149.50	288.00	149.80	295.00	149.78	291.00
149.80	285.00	149.45	268.00	149.55	296.00	149.55	293.00
155.03	230.00	154.90	221.00	155.18	239.00	154.83	237.00
154.73	225.00	154.65	218.00	155.03	231.00	154.90	230.00
154.73	225.00	154.53	218.00	154.73	231.00	154.70	229.00
160.25	185.00	159.93	173.00	160.10	196.00	160.13	194.00
160.03	185.00	159.85	175.00	159.90	196.00	160.00	194.00
159.70	185.00	159.60	175.00	159.63	196.00	159.73	194.00
165.33	155.00	164.73	150.00	164.85	161.00	165.00	158.00
165.08	150.00	164.43	143.00	164.55	154.00	164.93	153.00
164.80	150.00	164.75	144.00	164.80	151.00	164.55	149.00
170.38	125.00	170.03	122.00	169.90	127.00	169.88	126.00
170.40	120.00	169.83	115.00	169.50	121.00	169.48	119.00
170.13	120.00	169.45	115.00	169.93	121.00	169.35	119.00

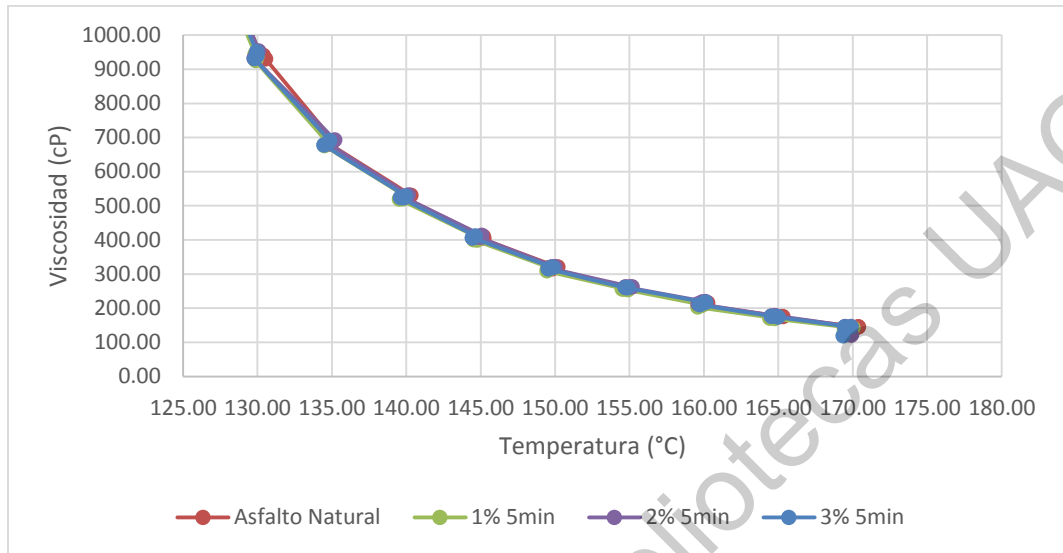


Figura 26. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO.

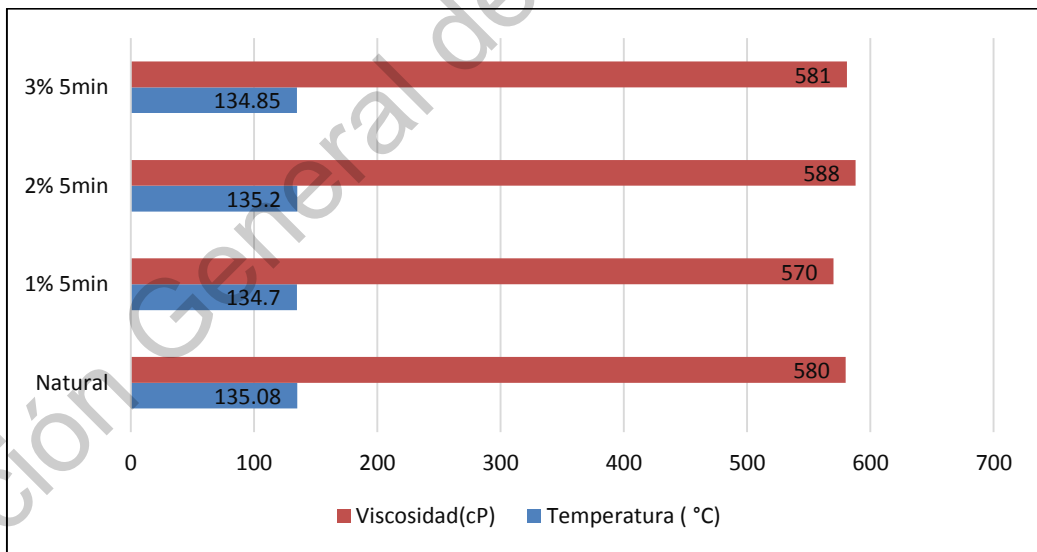


Figura 27. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5min de molido del material antes del RTFO a 135 °C

Tabla 5. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO.

Natural		1 % 10min		2% 10min		3% 10min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	770.00	124.93	763.00	124.90	756.00	124.93	748.00
125.33	775.00	125.08	765.00	125.13	758.00	125.00	751.00
125.20	775.00	125.13	765.00	125.10	765.00	124.80	765.00
130.13	705.00	130.25	691.00	130.15	687.00	129.88	680.00
130.40	700.00	130.28	692.00	130.15	685.00	130.13	680.00
130.55	695.00	130.08	688.00	129.95	685.00	130.05	681.00
135.08	580.00	135.03	566.00	135.05	563.00	134.63	563.00
134.83	575.00	134.83	562.00	134.90	557.00	134.48	551.00
134.88	575.00	134.58	562.00	134.68	557.00	134.68	551.00
140.33	460.00	140.05	456.00	140.05	449.00	139.63	450.00
140.05	455.00	139.93	452.00	139.95	443.00	139.60	439.00
139.83	455.00	139.73	448.00	139.73	442.00	139.88	436.00
145.18	360.00	144.98	343.00	144.98	348.00	144.93	340.00
145.23	360.00	144.98	343.00	144.95	348.00	144.65	340.00
145.00	360.00	144.75	343.00	144.75	347.00	144.55	341.00
150.20	290.00	150.05	286.00	149.88	281.00	149.48	280.00
150.08	290.00	149.95	287.00	149.60	281.00	149.45	281.00
149.80	285.00	149.68	260.00	149.53	266.00	149.70	252.00
155.03	230.00	155.03	217.00	154.88	217.00	155.05	207.00
154.73	225.00	154.98	215.00	154.60	217.00	154.85	211.00
154.73	225.00	154.68	215.00	154.50	216.00	154.63	211.00
160.25	185.00	160.08	168.00	160.13	172.00	159.68	166.00
160.03	185.00	159.80	170.00	160.08	171.00	159.35	160.00
159.70	185.00	159.65	170.00	159.80	171.00	159.80	160.00
165.33	155.00	165.20	148.00	164.98	143.00	165.23	139.00
165.08	150.00	164.95	140.00	164.58	141.00	165.03	133.00
164.80	150.00	164.73	142.00	164.45	140.00	164.75	134.00
170.38	125.00	170.23	121.00	169.68	120.00	169.83	116.00
170.40	120.00	169.95	113.00	169.45	114.00	169.43	112.00
170.13	120.00	169.65	113.00	169.60	115.00	169.35	112.00

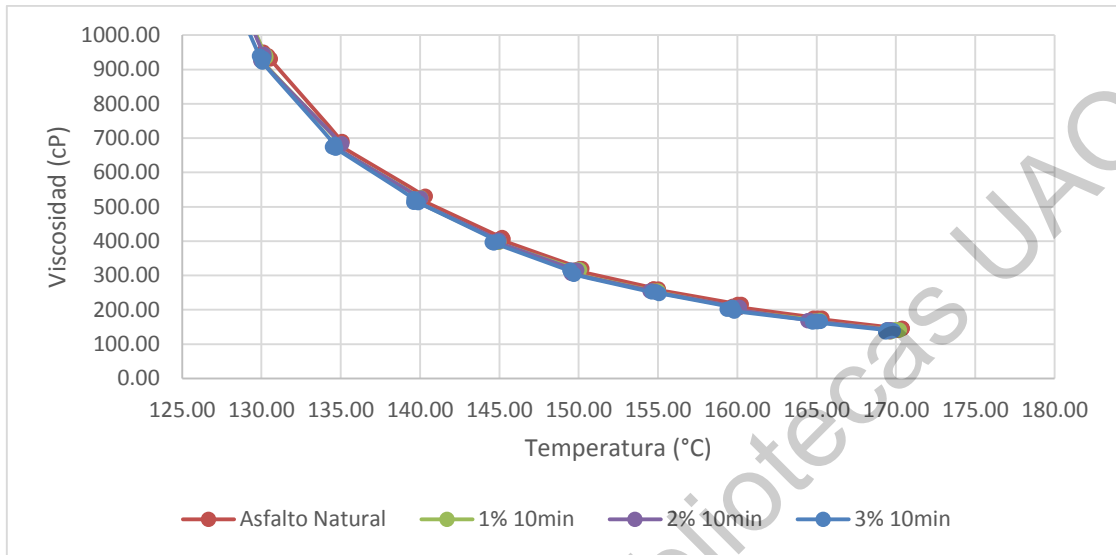


Figura 28. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO.

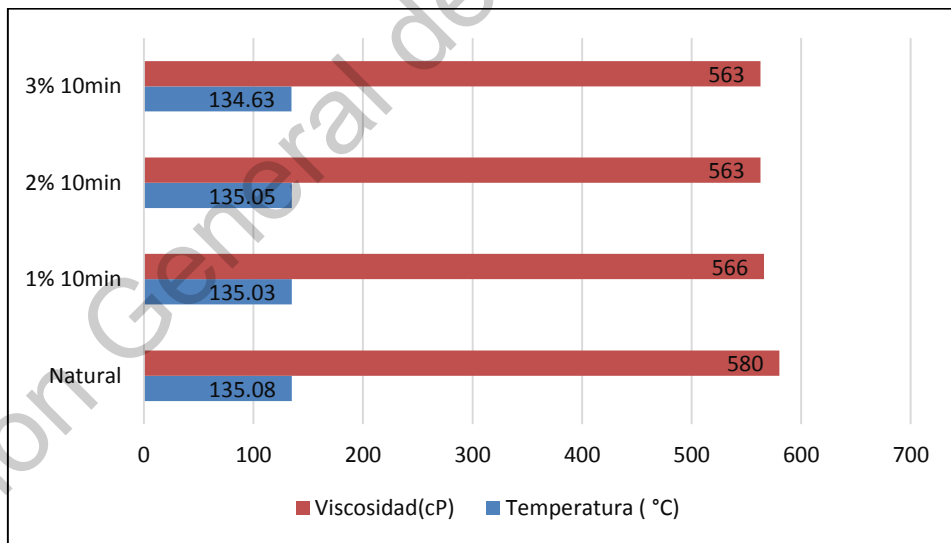


Figura 29. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material antes del RTFO a 135 °C.

Tabla 6. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 20min de molido del material antes del RTFO.

Natural		1 % 20min		2% 20min		3% 20min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	770.00	125.10	761.00	125.23	754.00	125.05	746.00
125.33	775.00	125.00	762.00	125.05	754.00	124.88	748.00
125.20	775.00	124.80	762.00	124.88	761.00	124.90	762.00
130.13	705.00	130.08	687.00	130.18	681.00	130.18	676.00
130.40	700.00	130.15	689.00	130.35	678.00	130.25	677.00
130.55	695.00	129.98	686.00	130.25	681.00	130.13	679.00
135.08	580.00	135.05	562.00	135.10	556.00	135.18	559.00
134.83	575.00	134.88	558.00	134.88	550.00	135.08	547.00
134.88	575.00	134.68	558.00	134.75	550.00	134.85	547.00
140.33	460.00	140.20	455.00	140.33	444.00	140.18	449.00
140.05	455.00	140.18	451.00	140.23	438.00	139.95	438.00
139.83	455.00	139.95	446.00	139.95	438.00	139.75	434.00
145.18	360.00	144.93	338.00	144.80	346.00	145.18	335.00
145.23	360.00	144.65	338.00	144.65	346.00	144.98	335.00
145.00	360.00	144.55	338.00	144.88	345.00	144.75	336.00
150.20	290.00	149.95	285.00	149.73	277.00	150.08	279.00
150.08	290.00	149.68	286.00	149.58	277.00	150.13	280.00
149.80	285.00	149.55	252.00	149.88	263.00	149.93	244.00
155.03	230.00	155.20	213.00	155.40	215.00	155.10	203.00
154.73	225.00	155.05	212.00	155.20	216.00	155.05	208.00
154.73	225.00	154.78	212.00	154.90	214.00	154.73	208.00
160.25	185.00	160.03	163.00	160.15	170.00	160.15	161.00
160.03	185.00	159.70	165.00	159.95	169.00	160.23	155.00
159.70	185.00	159.60	165.00	159.70	169.00	159.95	155.00
165.33	155.00	165.00	146.00	165.03	140.00	165.38	137.00
165.08	150.00	164.58	137.00	164.75	140.00	165.20	130.00
164.80	150.00	164.53	140.00	164.45	138.00	164.93	132.00
170.38	125.00	169.88	120.00	169.83	119.00	170.40	115.00
170.40	120.00	169.50	111.00	169.58	112.00	170.23	110.00
170.13	120.00	169.63	111.00	170.00	114.00	169.93	110.00

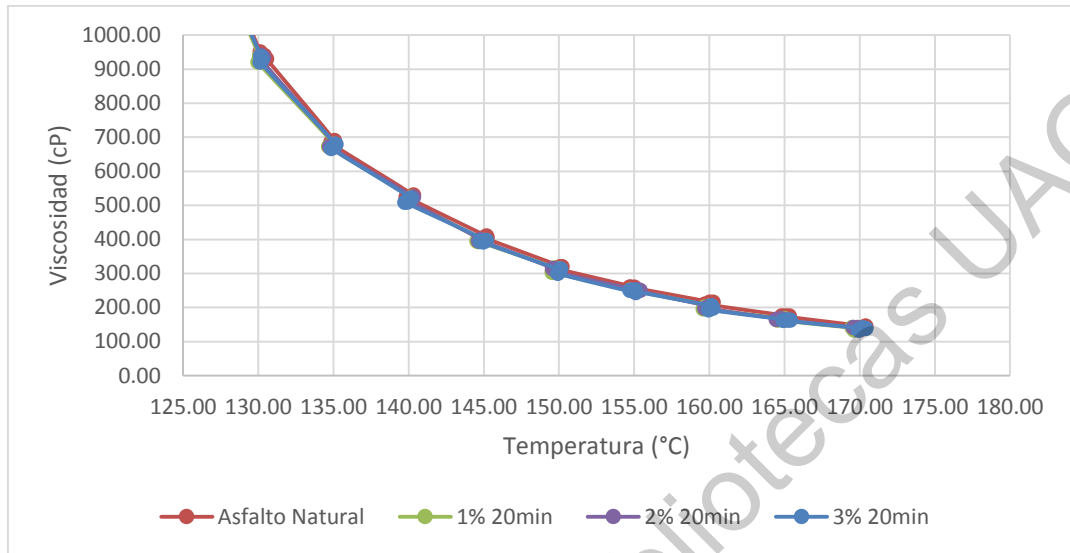


Figura 30. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20min de molido del material antes del RTFO.

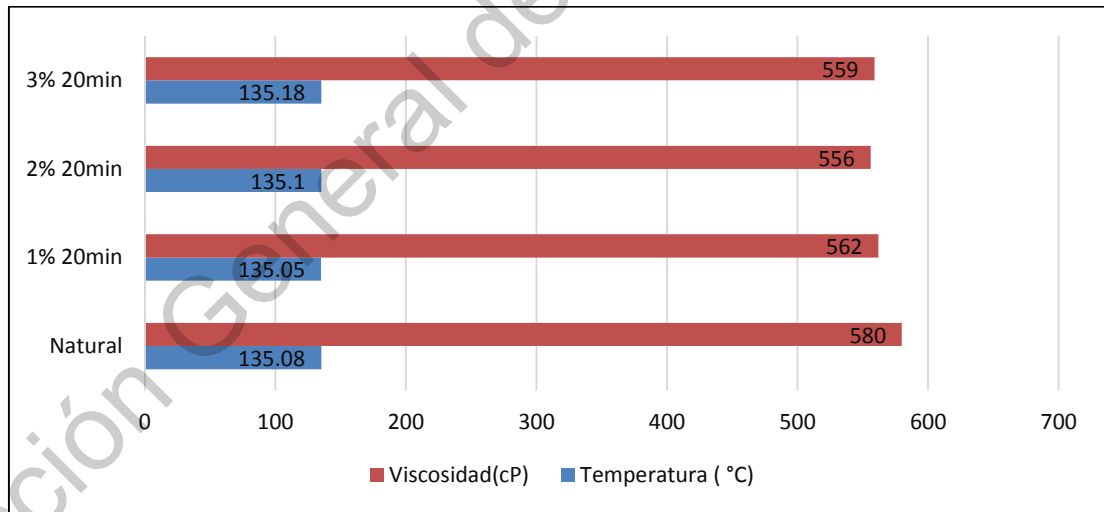


Figura 31. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 20min de molido del material antes del RTFO a 135 °C.

Para la adición de 20min ocurre la mayor disminución de la viscosidad en el material con una reducción de 21 cP para el mayor valor que corresponde a la adición del 3% con 20 min como muestra la tabla 7.

Luego del proceso de envejecimiento se vuelve a realizar el mismo análisis para cada una de las mezclas. Esta vez las observaciones van encaminadas al estudio del comportamiento con respecto al material base.

Como se aprecia en la tabla del anexo 7.10, los valores de viscosidad respecto a las temperaturas en análisis son mucho mayores debido al proceso de envejecimiento al que se expuso el material.

Centrando el análisis en la comparativa antes y después del proceso de envejecimiento se aprecia que el comportamiento de la mezcla es similar a pesar que sus índices de viscosidad son más altos, la diferencia fundamental se encuentra en que antes del proceso de envejecimiento con respecto a al mezcal base existía una mejora de 6, 10 y 13 cP respectivamente luego del RTFO se mantiene con valores más discretos 3, 5 y 7 cP demostrando que el material una vez adicionado mejora la viscosidad y luego del proceso de envejecimiento ejerce un control sobre la mezcla capaz de mantenerlos en las proximidades del asfalto natural y aun brindándole una mejor viscosidad.

Tabla 7. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5 min de molido del material después del RTFO.

Natural		1 % 5min		2% 5min		3% 5min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	1550.00	124.90	1545.00	125.10	1551.00	124.93	1548.00
125.33	1515.00	124.88	1509.00	125.25	1517.00	124.93	1514.00
125.20	1490.00	124.73	1487.00	125.20	1492.00	124.75	1491.00
130.13	950.00	129.85	944.00	130.08	953.00	129.95	951.00
130.40	940.00	129.98	936.00	129.88	941.00	129.98	939.00
130.55	930.00	129.88	925.00	129.78	932.00	129.80	931.00
135.08	690.00	134.70	685.00	135.20	693.00	134.85	691.00
134.83	685.00	134.55	680.00	135.05	687.00	134.75	684.00
134.88	680.00	134.50	676.00	134.80	681.00	134.48	678.00
140.33	530.00	139.95	527.00	140.15	531.00	139.95	529.00
140.05	525.00	139.78	520.00	140.00	526.00	139.80	523.00
139.83	525.00	139.55	519.00	139.75	527.00	139.60	524.00
145.18	410.00	144.93	404.00	145.08	413.00	144.65	411.00
145.23	405.00	144.78	399.00	145.03	408.00	144.45	406.00
145.00	405.00	144.53	400.00	144.83	408.00	144.45	406.00
150.20	320.00	149.75	317.00	150.00	321.00	149.88	319.00
150.08	320.00	149.50	318.00	149.80	321.00	149.78	319.00
149.80	315.00	149.45	309.00	149.55	318.00	149.55	315.00
155.03	260.00	154.90	254.00	155.18	262.00	154.83	259.00
154.73	260.00	154.65	256.00	155.03	262.00	154.90	260.00
154.73	260.00	154.53	256.00	154.73	262.00	154.70	260.00
160.25	215.00	159.93	210.00	160.10	219.00	160.13	217.00
160.03	215.00	159.85	208.00	159.90	218.00	160.00	215.00
159.70	210.00	159.60	203.00	159.63	213.00	159.73	210.00
165.33	175.00	164.73	171.00	164.85	177.00	165.00	174.00
165.08	175.00	164.43	170.00	164.55	177.00	164.93	175.00
164.80	175.00	164.75	169.00	164.80	178.00	164.55	176.00
170.38	145.00	170.03	142.00	169.90	146.00	169.88	145.00
170.40	145.00	169.83	143.00	169.50	146.00	169.48	145.00
170.13	140.00	169.45	137.00	169.93	121.00	169.35	119.00

Para los valores de 5min la mezcla no resultó aceptada ya que no existe un criterio favorable en cuanto a las mejoras con el parámetro viscosidad.

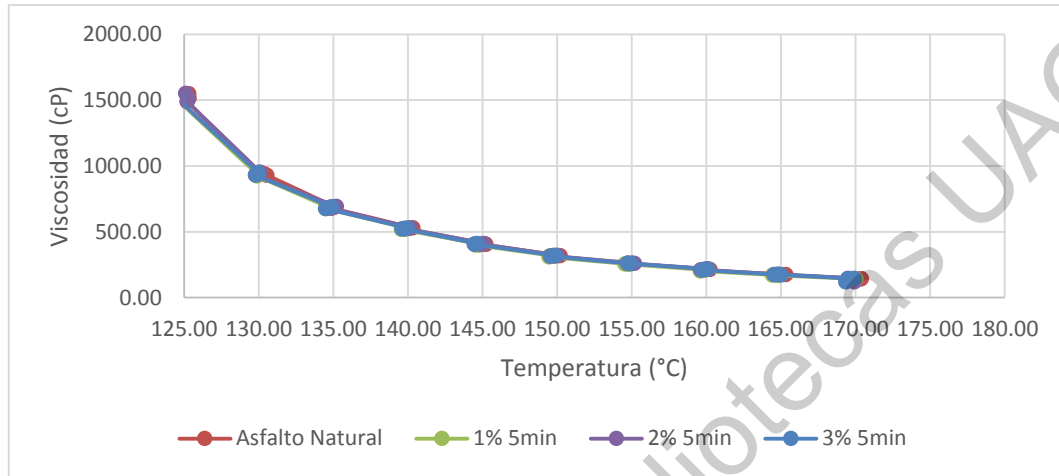


Figura 32. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 5 min de molido del material después del RTFO.

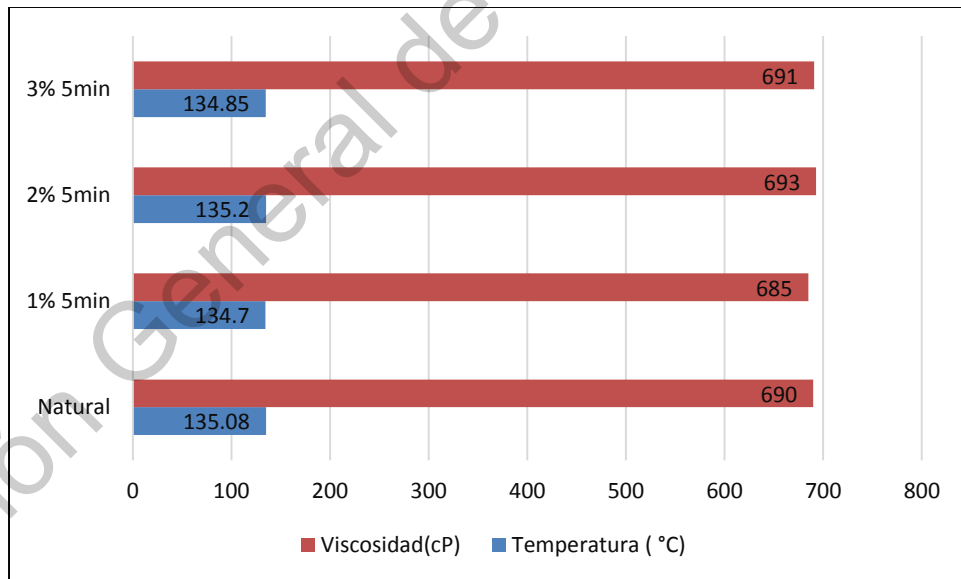


Figura 33. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 5min de molido del material después del RTFO a 135 °C.

Tabla 8. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10 min de molido del material después del RTFO.

Natural		1 % 10min		2% 10min		3% 10min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.3	1550	124.93	1544	124.9	1543	124.93	1538
125.33	1515	125.08	1507	125.13	1507	125	1502
125.2	1490	125.13	1485	125.1	1486	124.8	1485
130.13	950	130.25	941	130.15	943	129.88	939
130.4	940	130.28	935	130.15	935	130.13	931
130.55	930	130.08	923	129.95	926	130.05	921
135.08	690	135.03	682	135.05	683	134.63	659
134.83	685	134.83	678	134.9	677	134.48	644
134.88	680	134.58	675	134.68	673	134.68	640
140.33	530	140.05	526	140.05	525	139.63	493
140.05	525	139.93	519	139.95	518	139.6	483
139.83	525	139.73	517	139.73	517	139.88	482
145.18	410	144.98	401	144.98	403	144.93	369
145.23	405	144.98	396	144.95	398	144.65	366
145	405	144.75	397	144.75	398	144.55	366
150.2	320	150.05	316	149.88	315	149.48	285
150.08	320	149.95	317	149.6	315	149.45	285
149.8	315	149.68	306	149.53	306	149.7	273
155.03	260	155.03	252	154.88	252	155.05	217
154.73	260	154.98	254	154.6	254	154.85	222
154.73	260	154.68	254	154.5	254	154.63	222
160.25	215	160.08	206	160.13	207	159.68	177
160.03	215	159.8	205	160.08	206	159.35	171
159.7	210	159.65	200	159.8	201	159.8	166
165.33	175	165.2	169	164.98	167	165.23	146
165.08	175	164.95	168	164.58	169	165.03	145
164.8	175	164.73	166	164.45	168	164.75	144
170.38	145	170.23	141	169.68	142	169.83	140
170.4	145	169.95	142	169.45	142	169.43	139
170.13	140	169.65	135	169.6	136	169.35	135

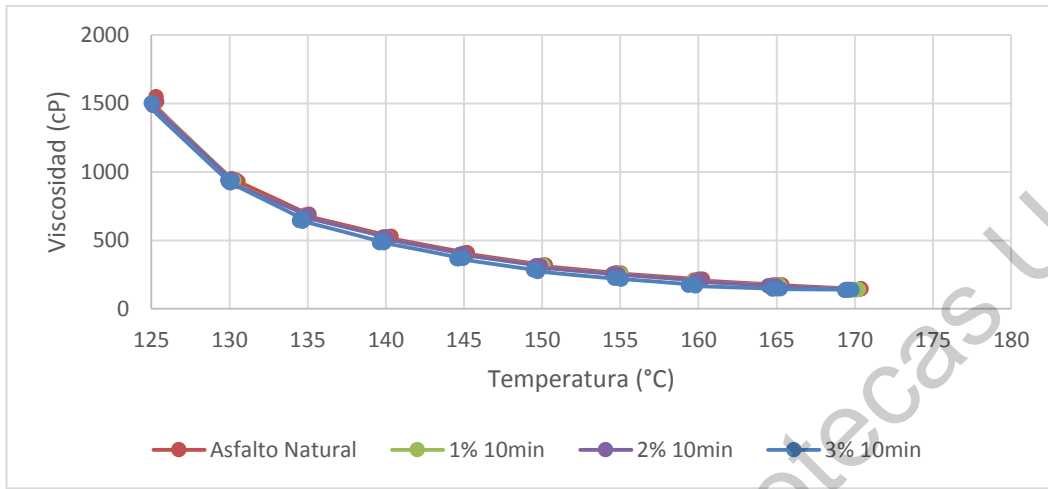


Figura 34. Viscosidad Rotacional Brookfield cP para 10 min de molido del material después del RTFO.

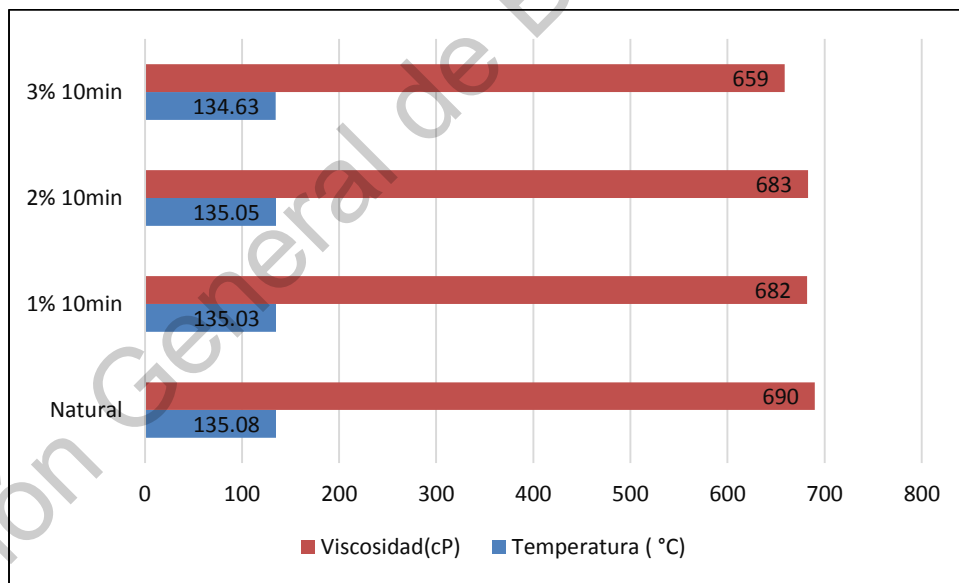


Figura 35. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 10min de molido del material después del RTFO a 135 °C.

Tabla 9. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20 min de molido del material después del RTFO.

Natural		1 % 20min		2% 20min		3% 20min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.3	1550	125.1	1540	125.23	1542	125.05	1535
125.33	1515	125	1503	125.05	1505	124.88	1499
125.2	1490	124.8	1484	124.88	1484	124.9	1484
130.13	950	130.08	938	130.18	940	130.18	937
130.4	940	130.15	932	130.35	934	130.25	929
130.55	930	129.98	920	130.25	924	130.13	920
135.08	690	135.05	680	135.1	680	135.18	649
134.83	685	134.88	675	134.88	675	135.08	627
134.88	680	134.68	672	134.75	672	134.85	623
140.33	530	140.2	524	140.33	524	140.18	477
140.05	525	140.18	515	140.23	517	139.95	466
139.83	525	139.95	513	139.95	515	139.75	465
145.18	410	144.93	398	144.8	400	145.18	353
145.23	405	144.65	393	144.65	395	144.98	348
145	405	144.55	395	144.88	395	144.75	350
150.2	320	149.95	314	149.73	314	150.08	267
150.08	320	149.68	316	149.58	314	150.13	269
149.8	315	149.55	303	149.88	303	149.93	256
155.03	260	155.2	248	155.4	250	155.1	200
154.73	260	155.05	252	155.2	252	155.05	206
154.73	260	154.78	252	154.9	252	154.73	206
160.25	215	160.03	205	160.15	203	160.15	186
160.03	215	159.7	201	159.95	203	160.23	179
159.7	210	159.6	196	159.7	198	159.95	174
165.33	175	165	167	165.03	165	165.38	149
165.08	175	164.58	165	164.75	167	165.2	149
164.8	175	164.53	163	164.45	165	164.93	148
170.38	145	169.88	139	169.83	141	170.4	145
170.4	145	169.5	141	169.58	141	170.23	147
170.13	140	169.63	134	170	134	169.93	134

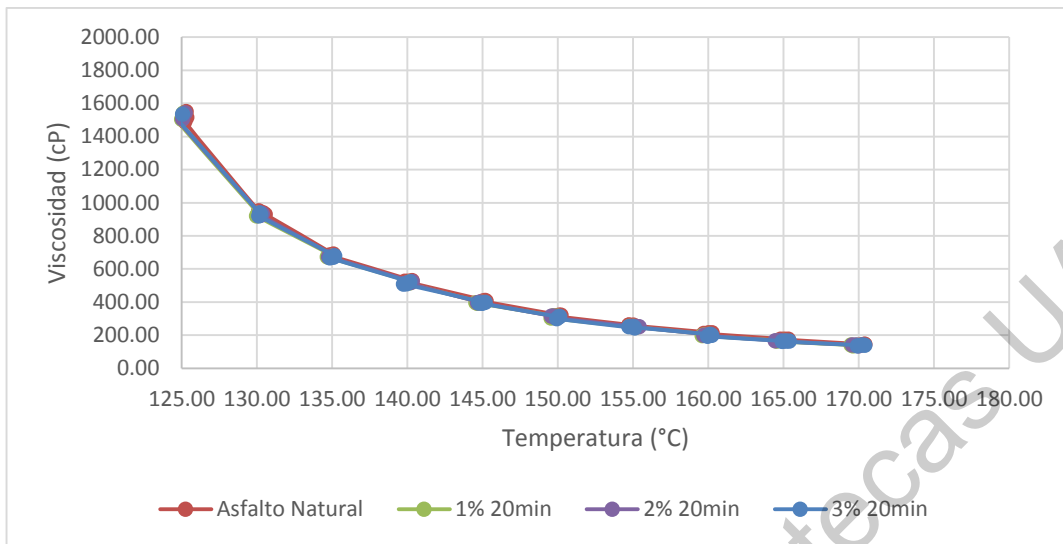


Figura 36. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20 min de molido del material después del RTFO.

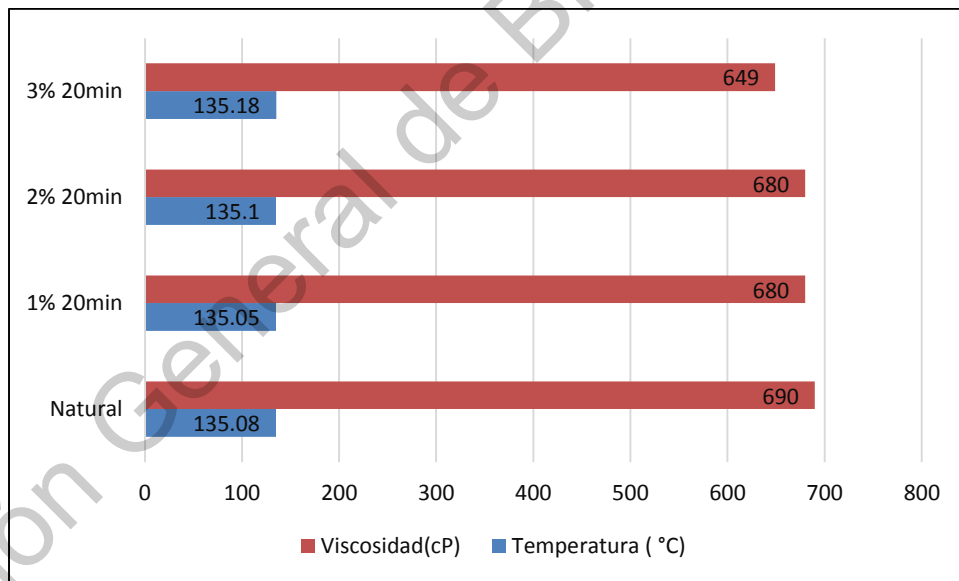


Figura 37. Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 20min de molido del material después del RTFO a 135 °C.

Para las modificaciones con biomaterial sometido a 20 min de molido se obtiene el mejor resultado, antes del proceso de envejecimiento del material el valor para la temperatura en análisis de 135 °C era de 559 cP y luego del envejecimiento 649 cP esto hace que entre estos valores la diferencia se encuentre en unos 90 cP. Si se tiene en cuenta que la diferencia modular del asfalto natural entre sus valores antes y después del RTFO es de 110 cP, la muestra es capaz de mantener en mayor medida la proximidad de sus resultados con la incorporación.

4.4.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

La modificación del asfalto base EKBE 64-22 con la incorporación del biomaterial generó un material con variable resistencia a deformarse ante las condiciones de carga establecidas, resultado esperado por la investigación.

En las mezclas tanto antes como después de envejecidas, los resultados obtenidos fueron muy próximos a los del asfalto natural base con variaciones en el orden de décimas, muy poco significativo en este ensayo, mostrando distanciamiento muy discreto entre los valores. Ante esta situación se decidió hacer una comparativa entre los ligantes para una temperatura donde todos cumplieran, esta temperatura elegida fue de 64 °C.

Según SUPERPAVE en sus especificaciones, el parámetro $G^*/\sin\delta$ debe ser mayor o igual a 1kPa para el ligante asfáltico (SUPERPAVE, 1994) para minimizar la deformación permanente. Este parámetro es el utilizado para medir el desempeño ante la resistencia a las roderas de los asfaltos; o sea, es la resistencia de los ligantes bajo las condiciones de temperaturas a las que esté sometido el pavimento durante su vida de servicio.

Para este análisis, el asfalto base para la investigación obtiene este valor a los 64 °C por lo que su grado desempeño (grado PG), es sobre dicha temperatura.

El comportamiento antes del envejecimiento en RTFO es variable, habiendo ocurrido algo muy similar en el ensayo Viscosidad Rotacional Brookfield donde la incorporación del material permite que en ciertas concentraciones disminuya la viscosidad, lo cual es un comportamiento no esperado ante la adición ya que en investigaciones precedentes donde se realizaron en su mayoría incorporaciones poliméricas ocurre el efecto contrario. El biomaterial mantiene oscilando los resultados con valores mayores y menores la muestra base, según el porcentaje de incorporación y el tiempo de molido, pero con distanciamientos muy discretos entre los resultados, véase figura 41.

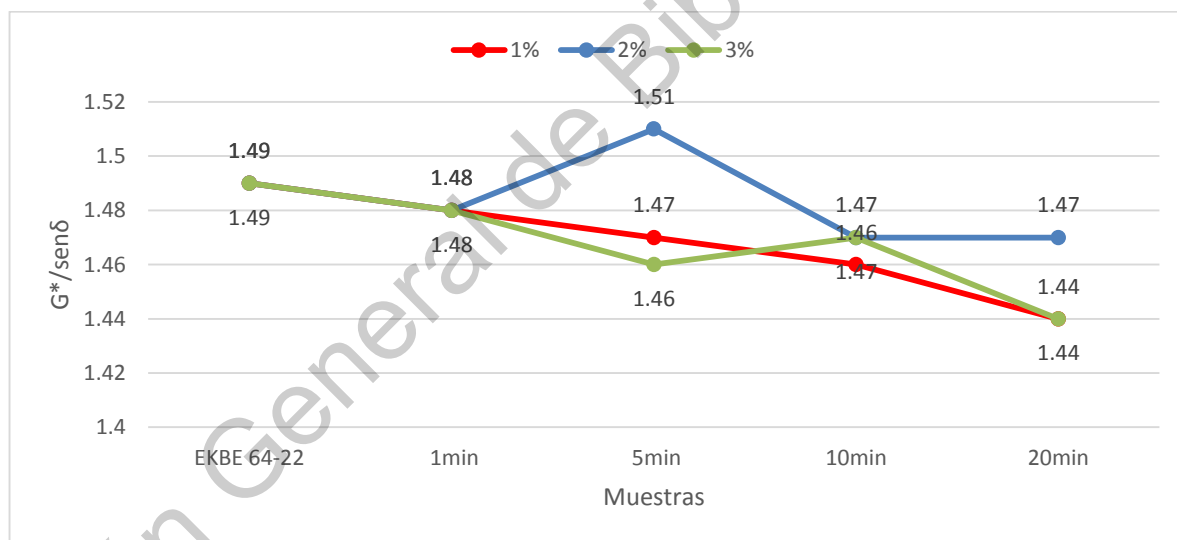


Figura 38. Valor para cada muestra de $G^*/sen\delta$ a una frecuencia de 10 rad/s y una temperatura de 64 °C antes del envejecimiento en RTFO.

Este comportamiento es reiterativo luego del envejecimiento en RTFO, produciéndose un aumento esperado de los valores luego de la exposición de las

muestras al horno de película delgada, empero el comportamiento se mantiene próximo al valor base envejecido, véase figura 42.

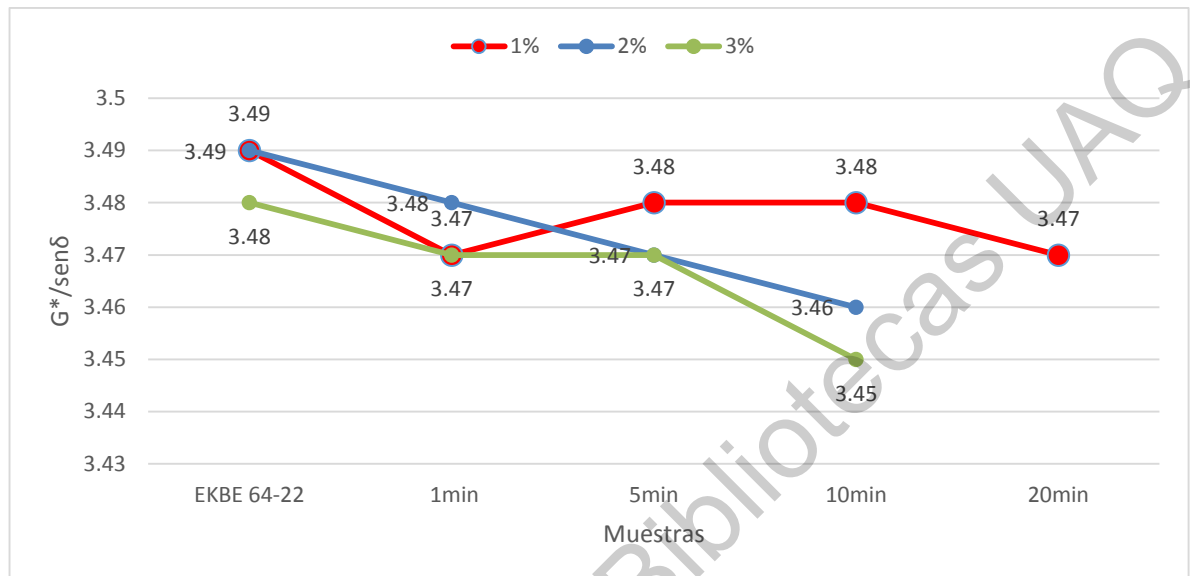


Figura 39. Valor para cada muestra de $G^*/\text{sen}\delta$ a una frecuencia de 10 rad/s y una temperatura de 64 °C después del envejecimiento en RTFO.

4.5 Discusión de resultados obtenidos

Luego de la investigación se asegura que es factible en varios porcentajes de adición, la incorporación del biomaterial como solución natural a la problemática del envejecimiento a corto plazo, que sufre el asfalto mexicano en su traslado de planta a obra, obteniendo un nuevo uso para un producto de desecho que está demostrado la contaminación que produce en su proceso de descomposición natural.

Los resultados deben de ser analizados desde el punto de vista de cada ensayo en cuestión, ya que la incorporación del biomaterial en un grupo de pruebas muestra mejores resultados que en otros, por ellos se hace necesario presentar dos tablas resúmenes, tabla 12 y tabla 13 con los valores obtenidos antes y después del

proceso de envejecimiento del ligante como las que se muestran a continuación para una mejor comprensión de los resultados.

La penetración como prueba mecánica realizada, muestra a la comparativas entre los resultados antes y después del proceso de envejecimiento para los ensayos luego del RTFO los porcentajes del 2% 1min, de 2% 20min y 3% 20min con valores de 22dmm, 27.6dmm y 26.8dmm respectivamente al compararlos con el asfalto antes del envejecimiento y a su vez las muestras bases con valores de 26.05dmm y 24.27dmm se observa que entre ellas hay una diferencia de 1.78dmm y entre los porcentajes de modificación antes señalados 1.45dmm, 1.15dmm, 1.2dmm, existiendo una mejora aceptable en cuanto a la penetración.

En la viscosidad rotacional se produce un aumento con respecto al asfalto base, los valores de 20 min de molido del material presentan los mejores resultados. Antes del proceso de envejecido del material, distando respecto al material base de 18, 24, 21cP respectivamente, luego del RTFO los resultados obtenidos fueron de 10 y 11cP siendo capaz de mantener en el material aceptables condiciones de viscosidad y en las proximidades del asfalto base.

En el ensayo módulo de elasticidad se busca los asfaltos que ante la modificación presenten un mayor valor promedio que el asfalto base, siendo los mayores módulos el asfalto de 1% - 1min de molido con un valor de 1.09 MPa, el de 3% - 5min con el mayor valor de todos con 1.21MPa, 3% - 10min con 0.94MPa y el de 3% - 20min con 1.09MPa, las adiciones de 3% son las que mejor respuesta tienen ante el módulo de elasticidad del material.

Para el módulo reológico de corte dinámico a la temperatura de análisis del asfalto fue de 64 °C, los valores son muy próximos al asfalto natural, antes y después de envejecido, las disminuciones son muy discretas, aunque las mayores apreciaciones son para las incorporaciones de 3% y 20 min de molido según podemos apreciar en las tablas resúmenes, tabla 12 y tabla 13.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tabla 10. Resumen de parámetros del asfalto modificado con el biomaterial café antes del RTFO.

ASFALTO	EKBE 64-22	ANTES DEL RTFO											
		1% 1min	1% 5min	1% 10min	1% 20min	2% 1min	2% 5min	2% 10min	2% 20min	3% 1min	3% 5min	3% 10min	3% 20min
Penetración a 25°C (dmm)	26.05	25.65	25.05	25.5	25.75	23.45	24.75	27.5	28.75	27.85	26.35	28.1	28.0
Módulo de elasticidad (MPa)	0.92	1.09	0.88	0.39	0.44	0.60	0.29	0.52	0.47	0.50	1.21	0.94	1.09
Viscosidad rotacional @ 135°C (cP)	580	574	570	566	562	570	588	563	556	567	581	563	559
Parámetro G*/senδ (kPa)	1.49 @ 64°C	1.48 @ 64°C	1.47 @ 64°C	1.46 @ 64°C	1.44 @ 64°C	1.48 @ 64°C	1.51 @ 64°C	1.47 @ 64°C	1.47 @ 64°C	1.48 @ 64°C	1.46 @ 64°C	1.47 @ 64°C	1.44 @ 64°C

Tabla 11. Resumen de parámetros del asfalto modificado con el biomaterial café después del RTFO.

ASFALTO	EKBE 64-22	DESPUÉS DEL RTFO											
		1% 1min	1% 5min	1% 10min	1% 20min	2% 1min	2% 5min	2% 10min	2% 20min	3% 1min	3% 5min	3% 10min	3% 20min
Penetración a 25°C (dmm)	24.27	24.15	23.53	23.8	24.2	22.0	23.3	26.0	27.6	26.3	24.77	26.5	26.8
Módulo de elasticidad (MPa)	2.15	2.11	1.24	1.83	1.16	1.67	0.96	1.31	1.28	1.32	0.78	2.19	1.64
Viscosidad rotacional @ 135°C (cP)	690	687	685	682	680	685	693	683	680	683	691	681	679
Parámetro G*/senδ (kPa)	3.49 @ 64°C	3.47 @ 64°C	3.48 @ 64°C	3.48 @ 64°C	3.47 @ 64°C	3.49 @ 64°C	3.48 @ 64°C	3.47 @ 64°C	3.46 @ 64°C	3.48 @ 64°C	3.47 @ 64°C	3.47 @ 64°C	3.45 @ 64°C

5. CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES

Una vez concluido el estudio podemos asegurar que con los valores obtenidos durante la investigación, la caracterización morfológica de la mezcla realizada, permitió varias imágenes detalladas. Las partículas de café helicoidales se detectan insertadas a la mezcla, para 3% de adición y 10 min de molido la presencia es mucho mayor, se puede plantear que ante la microscopía electrónica es la mezcla con mejores características, ya que demuestra claramente la presencia de una fase continua entre ambos materiales.

En la caracterización por espectroscopía IR se puede observar el grupo químico característico del asfalto en la banda de absorción 1373 cm^{-1} , se evidencia con claridad para los diferentes porcentajes de incorporación y tiempos de molido, no siendo así con la presencia del biomaterial donde se define con muy poca intensidad su banda característica 1750 cm^{-1} , asociado esta característica a los bajos porcentajes de incorporación que se manejan en la investigación.

En la prueba mecánica de penetración, la comparativa entre ambos gráficos antes y después del proceso de envejecimiento y sus restas modulares es lo que permite concluir que la incorporación del biomaterial es viable. Para el asfalto base antes y después del RTFO su resta modular es de 1.78 dmm, para las muestras con mejor comportamiento 2% 1min, 2% 20min y 3% 20min es 1.45 dmm, 1.15dmm, 1.20dmm respectivamente. Todos estos valores son inferiores en comparación con los resultados del asfalto base, lo que demuestra que con la incorporación del café existe una influencia menor del envejecimiento luego del RTFO. Se aprecia además que se modifican sus propiedades mecánicas, ya que en su mayoría los valores presentan mayor penetración, y la adición es capaz de mantener a la nueva mezcla envejecida más próxima a las condiciones

de la mezcla sin envejecer con el mismo porcentaje de incorporación y tiempo de molido.

En la prueba esfuerzo - deformación no todos los asfaltos modificados presentan mayor módulo elástico promedio que el asfalto original, reafirmando el comportamiento esperado ya que se está adicionando un nuevo material a la mezcla, siendo los mayores módulos el asfalto de 1% - 1min de molido con un valor de 1.09 MPa, el de 3% - 5min con el mayor valor de todos con 1.21MPa, 3% - 10min con 0.94MPa y el de 3% - 20min con 1.09MPa, las adiciones de 3% son las que mejor respuesta tienen ante el módulo de elasticidad del material, la modificación de sus propiedades mecánicas es apreciable. En otro escenario, un análisis de los resultados en las restas modulares obtenidos antes y después del RTFO, se detectó que la resta modular del asfalto base es de 1.23MPa y para las modificaciones 1% 20min, 2% 20min y 3% 20min son 0.72MPa, 0.81MPa y 0.55MPa respectivamente, la adición es capaz de mantener también los módulos de elasticidad más próximos a su valor antes de ser envejecidos, retardando este proceso en comparativa con el asfalto base.

En la prueba de viscosidad Brookfield se produce un aumento de la viscosidad con respecto al asfalto base, una clara evidencia de que la incorporación del biomaterial es capaz de modificar las propiedades reológicas de la mezcla. Para los porcentajes con mejores resultados ante esta prueba 3%-10min, 3%-20min y 2%-5min las restas modulares de los valores ante y después de ser envejecida las muestras en el RTFO son 96cP, 90cP y 105cP respectivamente, esta diferencia para el asfalto base es de 110cP, se aprecia claramente que todos son valores inferiores, demostrando un mejor comportamiento ante el envejecimiento que el asfalto natural.

Para el módulo reológico de corte dinámico a la temperatura de análisis del asfalto 64 °C los valores son muy próximos al asfalto natural, antes y después de ser envejecido, las disminuciones son muy discretas, aunque las mayores apreciaciones son para las incorporaciones de 3% y 20 min de molido.

Como conclusión general se puede señalar que la muestra 3% 20min resulta destacada ante la totalidad de los ensayos, lo demuestran los resultados de la prueba mecánica de penetración con 26.8 dmm, esfuerzo – deformación 1.09 MPa, así como prueba de viscosidad Brookfield con ganancia de 21cP y módulo reológico e corte dinámico de 3.45@64°C, demostrando que el incremento del porcentaje de incorporación y el tiempo de molido del material tiene una tendencia a mejorar las propiedades mecánicas y reológicas de las muestras como su respuesta ante la oxidación.

Como línea futura de investigación, se propone utilizar el diseño experimental con mayores porcentajes de incorporación a la mezcla que excedan el 3%, así como aumentar el tiempo de molido del biomaterial. En la caracterización por espectroscopía IR la presencia del material modificador fue casi imperceptible debido a su baja concentración, y las propiedades de los materiales tanto mecánicas y reológicas tienen una tendencia a mejorar la respuesta ante la oxidación si se incrementan estas variables.

6. REFERENCIAS

Abreu, L.P., Oliveira, J.R., Silva, H.M. & Fonseca, P.V. (2015). Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials. *Construction and Building Materials*, 37(84), 230-238.

Arenas, H. L. (2000). Tecnología del cemento asfáltico. *Fundación para Actividades de Investigación y Desarrollo*, 10 (36), 14-20.

Ali, I. A., Ismail, A., Yusoff, N. I., Karim, M.R., Al-Mansob, R. A., & Alhamali, D.I. (2015). Physical and rheological properties of acrylate–styrene–acrylonitrile modified asphalt cement. *Construction and Building Materials*, 35 (94), 326-334.

Baghaee, T., Soltani, M., Karim, M.R., Baaj, H. (2015). Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology. *Measurement*, 65 (74), 159-169.

Canet, B. (2016). La Situación y Tendencias de La Producción de Café en América Latina y El Caribe. *IICA*, 12 (20), 1–5.

Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 12 (21), 1011-1015.

Cardona, R. (2016). *Caracterización de un agregado reciclado de concreto para la construcción de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles* (tesis doctoral). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.

Casey, D., McNally, C., Gibney, A. & Gilchrist, M. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 13 (52), 1167- 1174.

Cervantes, V. y Fonseca, F. (2014). Asfaltos Modificados con Polímeros, el Estado de la Práctica en Costa Rica. *Boletín Técnico*, 31 (5), 59-62.

Cincire, V. (2013). Beneficios de los cementos asfálticos PG modificados con polímeros. *Revista Vías Terrestres*, (340), 21-24.

Coronado, M. (2015). Antioxidantes, perspectiva actual para la salud humana. *Educación XXI*, 16 (2), 39-62. Recuperado de:
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/rchnut/v42n2/art14.pdf>.

Cremades, I. (2010). Los asfaltos, pasado, presente y futuro. *Asfáltica Revista Técnica*, 41 (23), 3-8.

Cruz, L. (2011). Huella dactilar del polímero en el asfalto, avances en la identificación química. *Revista técnica*, 67 (14), 4-6.

Fang, C., Qiao, X. & Xia, R. (2016). Influence of modification process parameters on the properties of crumb rubber/EVA modified asphalt. *Journal Applied Polymer*, 89 (43598), 1-13.

Gamboa, J. (2016). *Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Modificadas vs Mezcla Tradicional*. Medellín: Alfaomega Colombiana.

Gloess, A., Schönbächler, B., Klopprogge, B., D'Ambrosio, L., Chatelain, K., Bongartz, A., et al. (2013). Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis | SpringerLink. *European Food Research and Technology*, 23 (4), 607–627.

Godos, J., Pluchinotta, F. y Marventano, S. (2014). Coffee components and cardiovascular risk: beneficial and detrimental effects. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65 (8), 925–936.

Hernández, G. (2019). Caracterización Morfológica de Asfalto Modificado con diferentes Copolímeros a altas concentraciones. *Revista Química Hoy*, 1 (3), 6-9.

Kent, R.H. & Audrey, C. (2015). *Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage*. Washington, DC: National Asphalt Pavement Association.

Liang, M., Liang, P. & Nan, G. (2015). Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. *Materials and Design*, 27 (88), 117-185.

Loria, L. (2007). Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio de distintos polímeros. *Infraestructura vial*, 19 (17), 6-8.

López, M., Pérez, A. y Garnica, P. (2014). Estado del arte sobre el uso de residuos y sub-productos industriales en la construcción de carreteras. *Infraestructura vial*, 62 (41), 4-7.

Montanelli, F. & Iterchimica, S. (2013). Polymeric compound for high modulus Polymer Modified Asphalt (PMA). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 31 (104), 39 - 48.

Múnera, J. y Ossa, E. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto - Polímero. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 41 (70), 18-33.

Neveu Perez, V. J. (2010). Phenol-Explorer. *Database*, 13 (20), 13-20. Available from: <https://academic.oup.com/database/article/doi/10.1093/database/bap024/401207/Phenol-Explorer-an-online-comprehensive-database>.

Orosco, A. (2017). El estado actual del comercio mundial de café. *Organización internacional del café*, 26 (35), 23-35.

Oba, L., & Akpan P. (2015). The utilization of scrap tyre as aggregate in bituminous mixes for road construction. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5 (11), 6-11.

Patriche, S. & Dinică, R. (2015). Extraction and evaluation of bioactive compounds with antioxidant potential from green arabica coffee extract. *Ann Univ Dunarea Jos Galati Fascicle VI Food Technol*, 39 (2), 88–95.

Pedraza, B. y Castelán, O. (2016). La pulpa de café, un subproducto valioso para la alimentación del ganado lechero en los trópicos. *Bienal AMENA* 14(26), 43-50. Recuperado de <https://www.engormix.com/ganaderia-leche/articulos/pulpa-cafe-subproducto-valioso-t33082.htm>

Polacco, G. & Stastna, G. (2015). Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 24 (224), 72-112.

Priftis, A. (2015). Comparison of antioxidant activity between green and roasted coffee beans using molecular methods. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 12 (5), 7293–7302.

Rondón H. y Reyes F. (2009). Comportamiento de una mezcla densa en caliente elaborada con asfaltos modificados con asfaltita. *Tecno Lógicas*, 15 (22), 141-161.

Reyes, F., Madrid, M.F y Salas, S. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un elastómero (tiras de bolsa de leche) con asfalto 80-100. *Infraestructura Vial*, 47 (17), 25-34.

Group - Tecnología e Innovación. (2013). *Búsquedas en AC-20 Introducción al asfalto* [SEM]. Recuperado de:

<http://www.portalcomercialsmm.com/articlostecnicosAC20EKBEintroduccion/alasfalto.php1>.

Saura, J. (2014). Efectos de polifenoles sobre un modelo experimental de osteoporosis (Ph.D. Thesis). Universidad de Murcia. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/handle/10803/284790>.

Smith, K. (2014). La compra de asfalto. *Asfáltica Revista Técnica*, 23 (42), 46-47.

Souaya, E., Elkholy, S. & Rahman, A. (2015). Partial substitution of asphalt pavement with modified sulfur. *Egyptian Journal of Petroleum*, 46 (23), 56-68. Article in press: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.003>.

Tresserra, A. & Lamuela, R. (2015). Coffee Polyphenols and High Cardiovascular Risk Parameters. *Coffee in Health and Disease Prevention*, 56 (72), 387-394. Article in press: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00042-5>.

Villegas, R. y Aguiar, J., (2012), Procedimientos para la caracterización de ligantes asfálticos modificados. Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-online/INFORMES/2012/UMP-A-04-12.pdf>.

Yao, H., Dai, Q. & You, Z. (2015). Fourier Transform Infrared Spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 23 (101), 1078–1087.

Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 14 (63), 66-72.

Yut, I. & Zofka, A. (2015). Correlation between rheology and chemical composition of aged polymer-modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 25 (115), 109-117.

Zhang, F. & Hu, C. (2015). The research for high-elastic modified asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, 42 (132), 1-14.

Zhu, J., Birgisson, B. & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 35 (54), 18-38.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

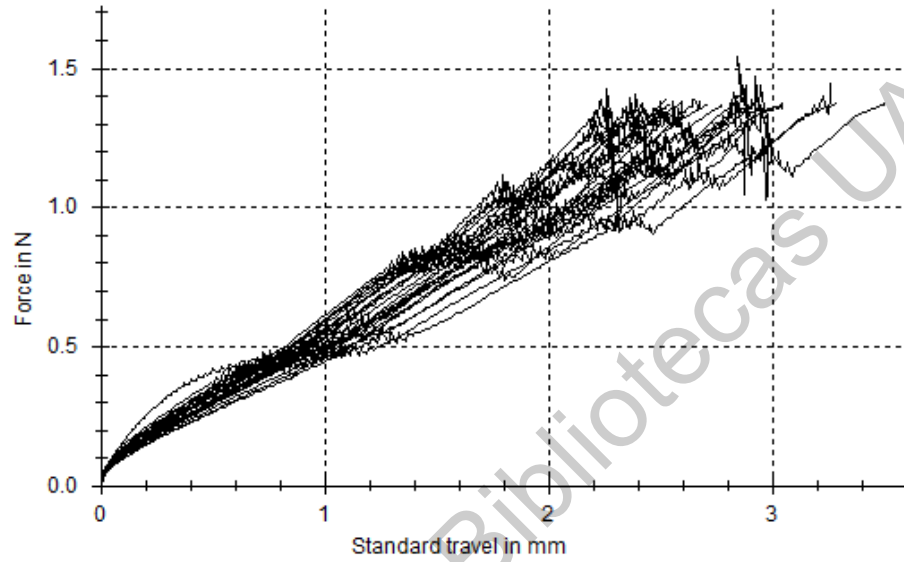
7. ANEXOS

7.1 Resultados del laboratorio referentes al ensayo de penetración

Nr	Diameter d0 mm	Lc mm	Specimen height mm	Fmax N	L at Fmax mm	F _{End} N	L _{End} mm	W _{End} Nm
1	14.76	29.15	29.15	1.37	2.94	1.03	2.98	0.00
2	14.76	29.15	29.15	1.47	2.92	1.02	2.97	0.00
3	14.68	29.3	29.30	1.44	2.87	1.44	2.87	0.00
4	14.68	29.3	29.30	1.54	2.84	1.22	2.90	0.00
5	14.81	29.09	29.09	1.39	2.52	1.39	2.53	0.00
6	14.81	29.09	29.09	1.38	2.59	1.38	2.60	0.00
7	14.63	29.27	29.27	1.41	2.38	1.33	2.42	0.00
8	14.63	29.27	29.27	1.37	2.58	1.37	2.59	0.00
9	14.57	29	29.00	1.40	2.25	1.05	2.32	0.00
10	14.57	29	29.00	1.37	2.77	1.37	2.77	0.00
11	14.8	28.69	28.69	1.37	2.89	1.37	2.90	0.00
12	14.8	28.69	28.69	1.44	2.94	1.16	2.97	0.00
13	14.31	28.55	28.55	1.45	3.25	1.45	3.25	0.00
14	14.31	28.55	28.55	1.37	3.49	1.37	3.50	0.00
15	14.86	28.69	28.69	1.36	3.03	1.35	3.05	0.00
16	14.86	28.69	28.69	1.37	3.04	1.37	3.05	0.00
17	15.36	29.56	29.56	1.39	2.64	1.38	2.68	0.00
18	15.36	29.56	29.56	1.38	2.55	1.37	2.92	0.00
19	14.59	29.4	29.40	1.43	2.25	1.01	2.28	0.00
20	14.59	29.4	29.40	1.37	2.53	1.36	2.54	0.00
21	14.86	27.66	27.66	1.36	2.40	1.32	2.50	0.00
22	14.86	27.66	27.66	1.35	2.50	1.32	2.60	0.00
23	14.72	30.35	30.35	1.40	2.83	1.04	2.87	0.00
24	14.72	30.35	30.35	1.37	3.27	1.37	3.28	0.00
25	14.57	29.15	29.15	1.37	2.36	1.37	2.71	0.00
26	14.57	29.15	29.15	1.38	2.50	1.37	2.50	0.00

7.2 Procesamiento de datos facilitado por el laboratorio ante el ensayo de penetración.

Series graph:

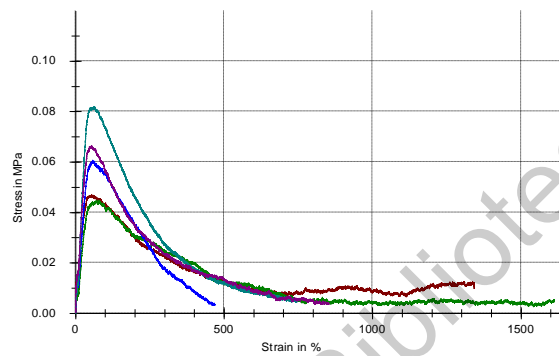


Statistics:

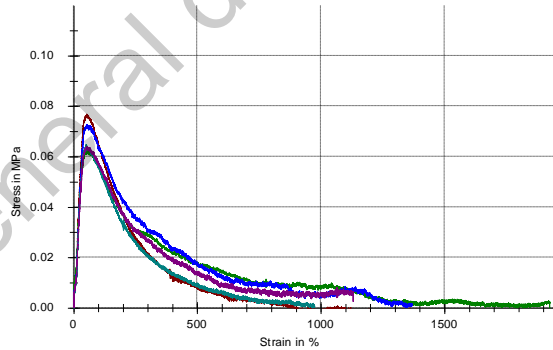
Series	Diameter d0	Lc	Specimen height	Fmax	L at Fmax	F _{End}	L _{End}	W _{End}
n = 26	mm	mm	mm	N	mm	N	mm	Nm
x	14.73	29.07	29.07	1.40	2.74	1.29	2.79	0.00
s	0.2371	0.6096	0.61	0.04	0.32	0.14	0.30	0.00
v	1.61	2.10	2.10	3.04	11.83	10.93	10.89	12.07

7.3 Gráficas de Esfuerzo – Deformación de cada material asfáltico según su porcentaje de incorporación y tiempo de molido del biomaterial.

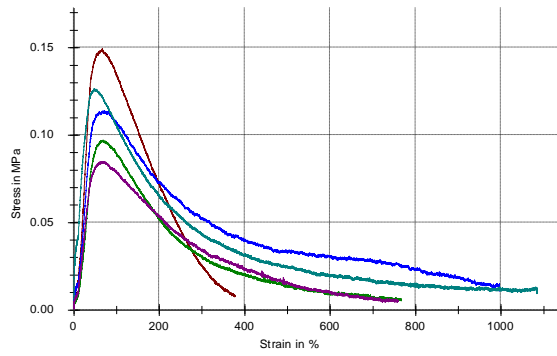
7.3.1 Asfalto Natural



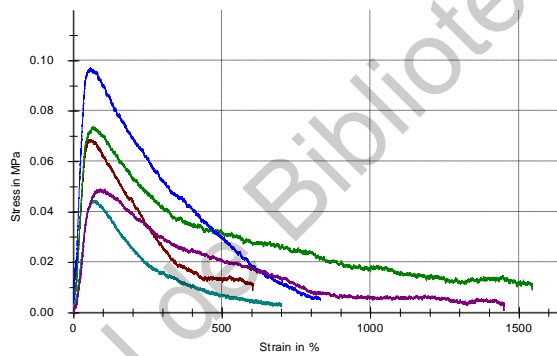
7.3.2 Asfalto Modificado 1% - 1min



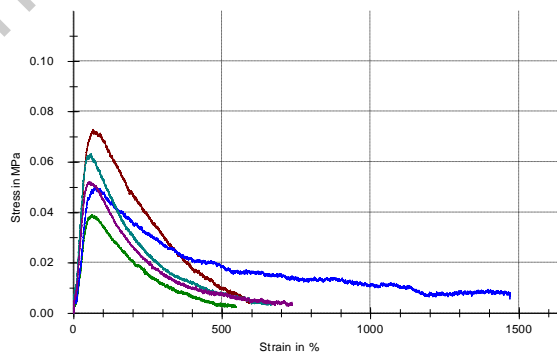
7.3.3 Asfalto Modificado 1% - 5min



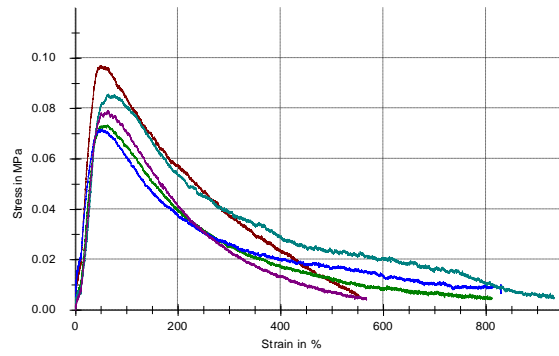
7.3.4 Asfalto Modificado 1% - 10min



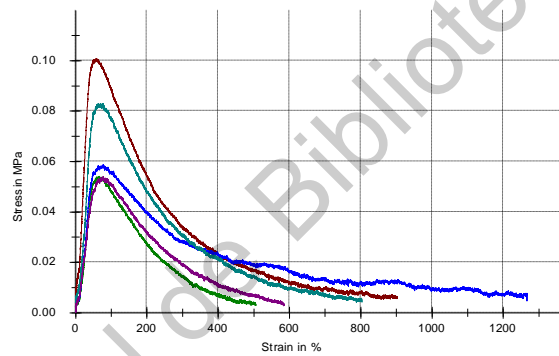
7.3.5 Asfalto Modificado 1% - 20min



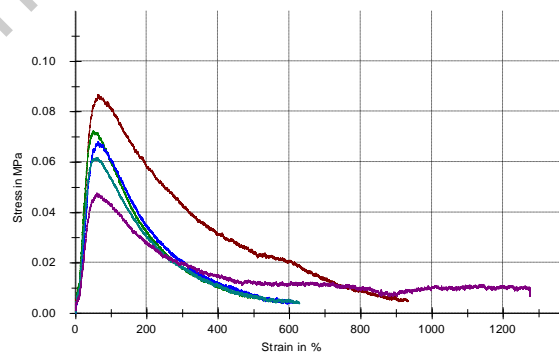
7.3.6 Asfalto Modificado 2% - 1min



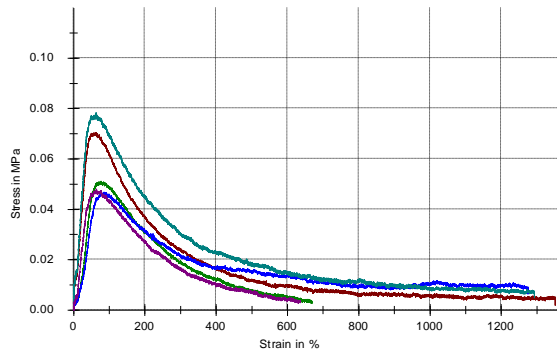
7.3.7 Asfalto Modificado 2% - 5min



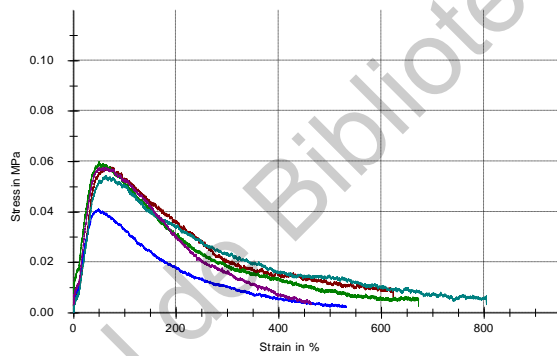
7.3.8 Asfalto Modificado 2% - 10min



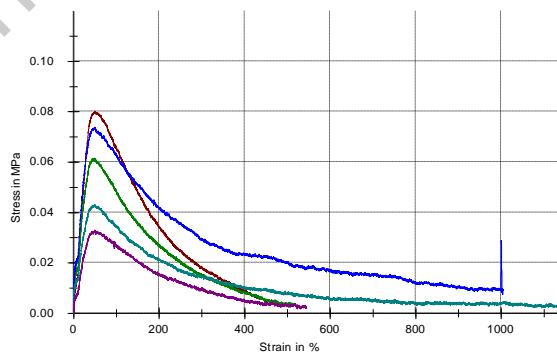
7.3.9 Asfalto Modificado 2% - 20min



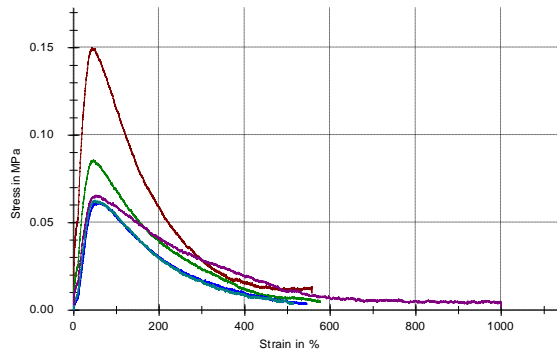
7.3.10 Asfalto Modificado 3% - 1min



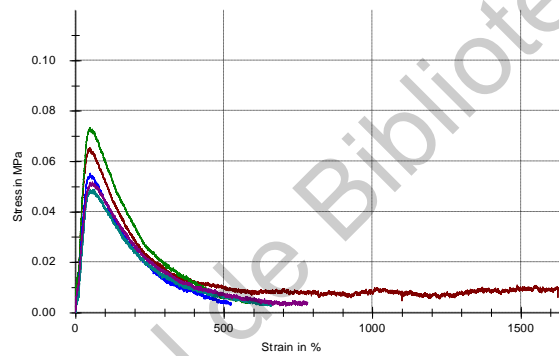
7.3.11 Asfalto Modificado 3% - 5min



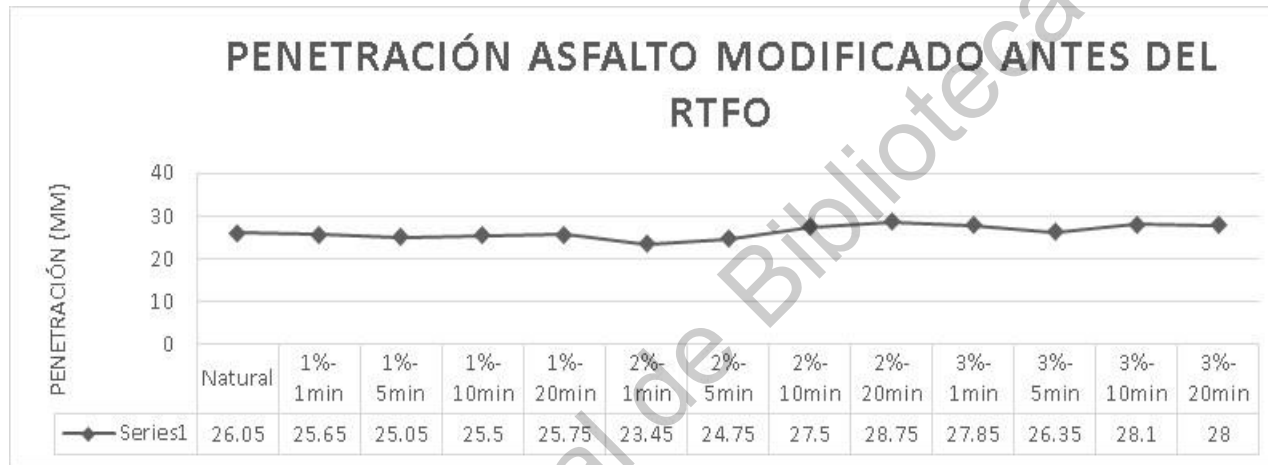
7.3.12 Asfalto Modificado 3% - 10min



7.3.13 Asfalto Modificado 3% - 20min



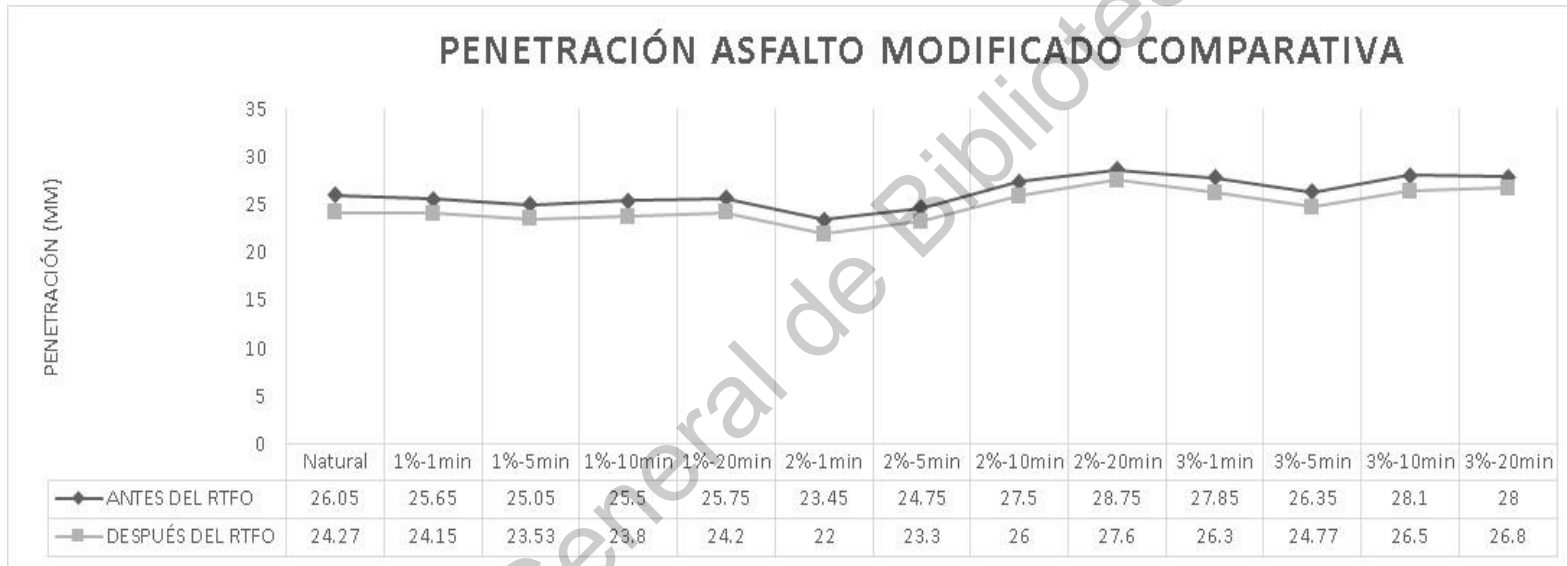
7.4 Resultados de penetración asfalto modificado antes del RTFO



7.5 Resultados de penetración asfalto modificado después del RTFO.



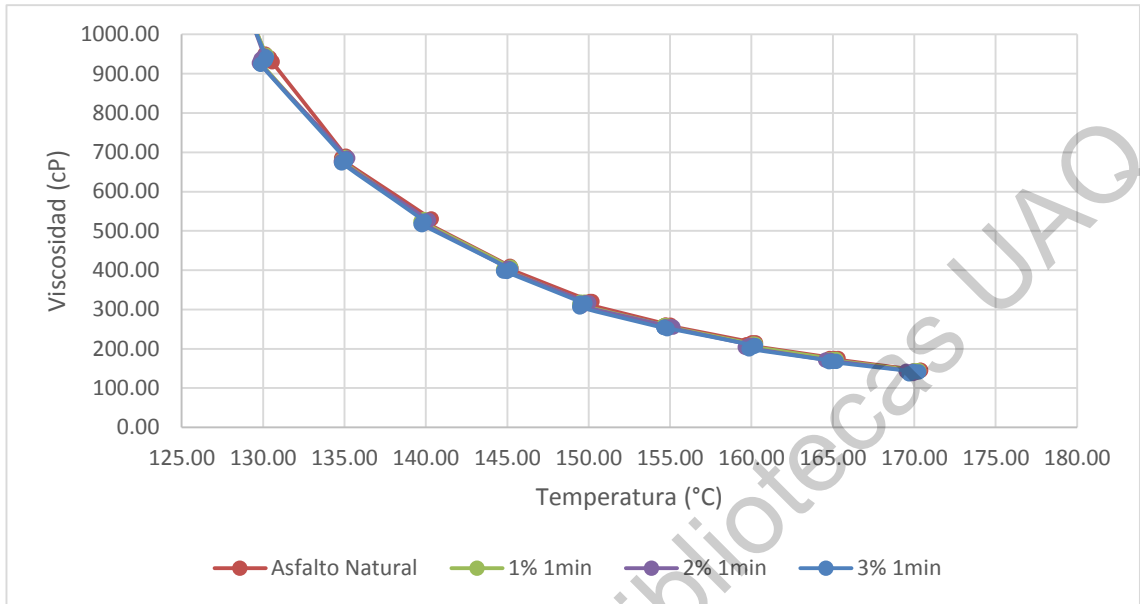
7.6 Resultados comparativos de penetración del asfalto modificado antes y después del envejecimiento en RTFO.



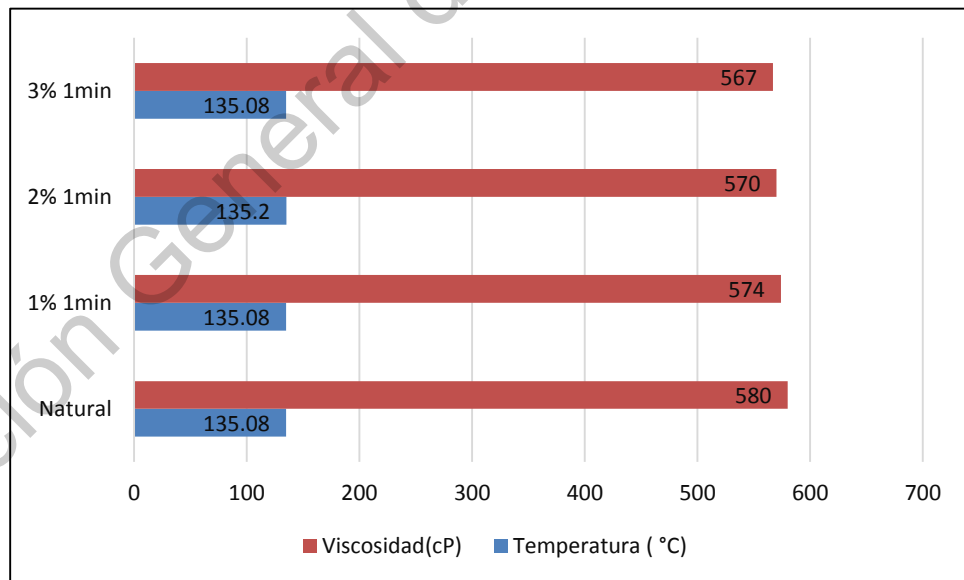
7.7 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material antes del RTFO.

Natural		1 % 1min		2% 1min		3% 1min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	770.00	125.08	767.00	125.10	758.00	125.08	750.00
125.33	775.00	124.90	450.00	125.25	762.00	124.90	754.00
125.20	775.00	124.70	771.00	125.20	750.00	124.70	768.00
130.13	705.00	130.20	699.00	130.08	693.00	130.20	684.00
130.40	700.00	130.13	698.00	129.88	692.00	130.13	683.00
130.55	695.00	129.85	692.00	129.78	689.00	129.85	683.00
135.08	580.00	135.08	574.00	135.20	570.00	135.08	567.00
134.83	575.00	135.05	570.00	135.05	564.00	135.05	555.00
134.88	575.00	134.83	570.00	134.80	564.00	134.83	555.00
140.33	460.00	139.90	458.00	140.15	454.00	139.90	451.00
140.05	455.00	139.70	454.00	140.00	448.00	139.70	440.00
139.83	455.00	139.75	452.00	139.75	446.00	139.75	438.00
145.18	360.00	145.20	353.00	145.08	350.00	145.20	345.00
145.23	360.00	144.98	353.00	145.03	350.00	144.98	345.00
145.00	360.00	144.78	353.00	144.83	349.00	144.78	346.00
150.20	290.00	149.78	288.00	150.00	285.00	149.78	281.00
150.08	290.00	149.50	289.00	149.80	285.00	149.50	282.00
149.80	285.00	149.45	276.00	149.55	269.00	149.45	260.00
155.03	230.00	154.83	225.00	155.18	219.00	154.83	211.00
154.73	225.00	154.63	221.00	155.03	218.00	154.63	214.00
154.73	225.00	154.63	221.00	154.73	218.00	154.63	214.00
160.25	185.00	160.25	178.00	160.10	174.00	160.25	171.00
160.03	185.00	160.10	180.00	159.90	173.00	160.10	165.00
159.70	185.00	159.85	180.00	159.63	173.00	159.85	165.00
165.33	155.00	165.20	152.00	164.85	146.00	165.20	141.00
165.08	150.00	164.98	146.00	164.55	142.00	164.98	136.00
164.80	150.00	164.78	146.00	164.80	142.00	164.78	136.00
170.38	125.00	170.28	123.00	169.90	121.00	170.28	117.00
170.40	120.00	169.98	117.00	169.50	116.00	169.98	114.00
170.13	120.00	169.68	117.00	169.93	116.00	169.68	114.00

7.8 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material antes del RTFO.



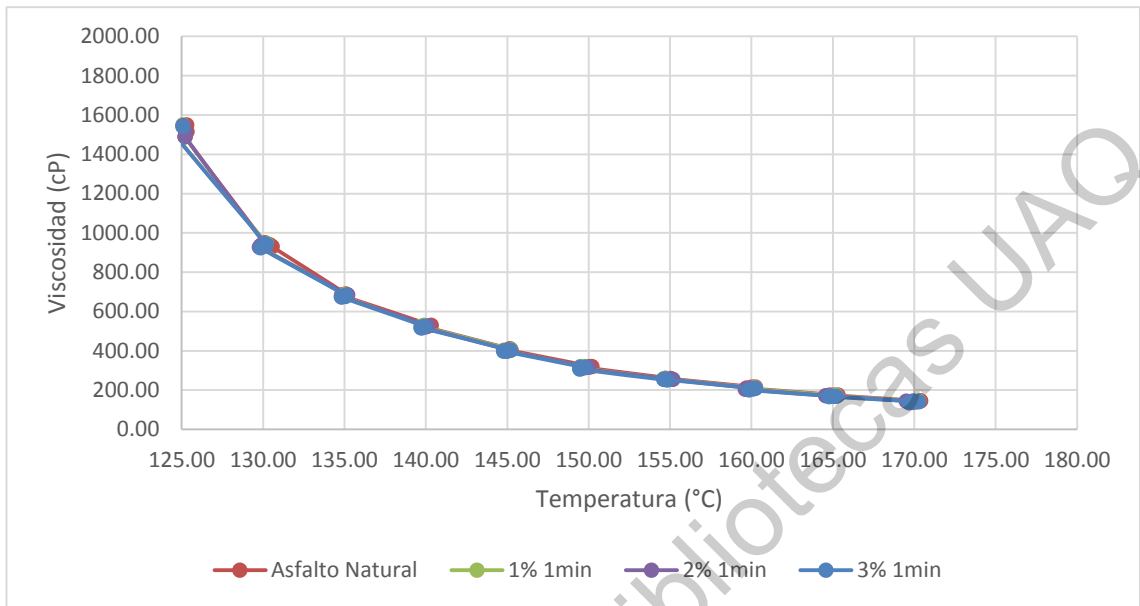
7.9 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material antes del RTFO a 135°C.



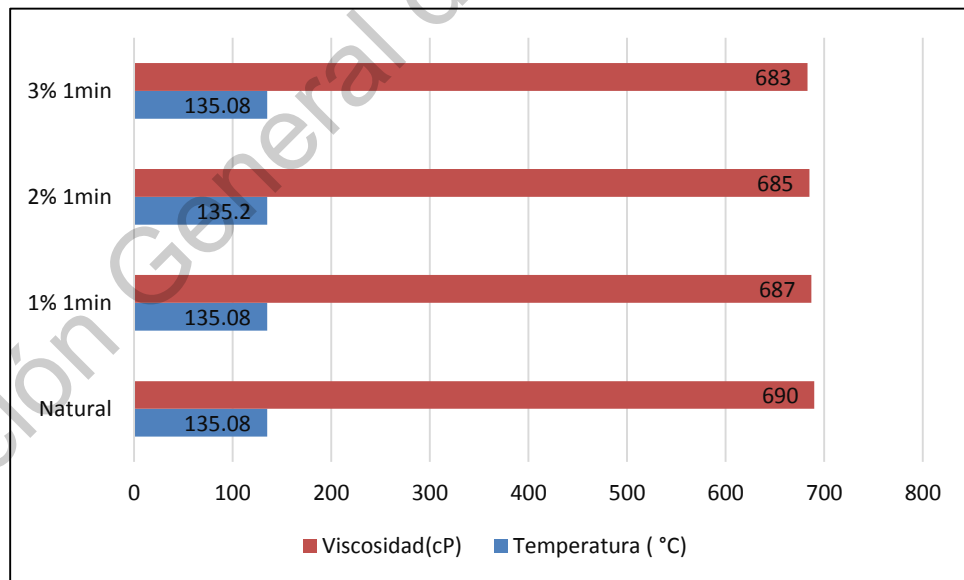
7.10 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material después del RTFO.

Natural		1 % 1min		2% 1min		3% 1min	
Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
125.30	1550.00	125.08	1549.00	125.10	1546.00	125.08	1542.00
125.33	1515.00	124.90	1508.00	125.25	1510.00	124.90	1506.00
125.20	1490.00	124.70	1488.00	125.20	1490.00	124.70	1486.00
130.13	950.00	130.20	947.00	130.08	945.00	130.20	942.00
130.40	940.00	130.13	939.00	129.88	937.00	130.13	934.00
130.55	930.00	129.85	928.00	129.78	927.00	129.85	924.00
135.08	690.00	135.08	687.00	135.20	685.00	135.08	683.00
134.83	685.00	135.05	683.00	135.05	680.00	135.05	677.00
134.88	680.00	134.83	679.00	134.80	676.00	134.83	673.00
140.33	530.00	139.90	529.00	140.15	527.00	139.90	525.00
140.05	525.00	139.70	524.00	140.00	521.00	139.70	517.00
139.83	525.00	139.75	523.00	139.75	520.00	139.75	516.00
145.18	410.00	145.20	407.00	145.08	405.00	145.20	402.00
145.23	405.00	144.98	402.00	145.03	400.00	144.98	397.00
145.00	405.00	144.78	402.00	144.83	400.00	144.78	398.00
150.20	320.00	149.78	319.00	150.00	317.00	149.78	315.00
150.08	320.00	149.50	319.00	149.80	317.00	149.50	316.00
149.80	315.00	149.45	312.00	149.55	309.00	149.45	306.00
155.03	260.00	154.83	258.00	155.18	255.00	154.83	251.00
154.73	260.00	154.63	258.00	155.03	256.00	154.63	254.00
154.73	260.00	154.63	258.00	154.73	256.00	154.63	254.00
160.25	215.00	160.25	211.00	160.10	209.00	160.25	208.00
160.03	215.00	160.10	212.00	159.90	209.00	160.10	205.00
159.70	210.00	159.85	207.00	159.63	204.00	159.85	200.00
165.33	175.00	165.20	173.00	164.85	170.00	165.20	168.00
165.08	175.00	164.98	173.00	164.55	171.00	164.98	168.00
164.80	175.00	164.78	172.00	164.80	170.00	164.78	167.00
170.38	145.00	170.28	144.00	169.90	143.00	170.28	141.00
170.40	145.00	169.98	144.00	169.50	143.00	169.98	142.00
170.13	140.00	169.68	138.00	169.93	137.00	169.68	136.00

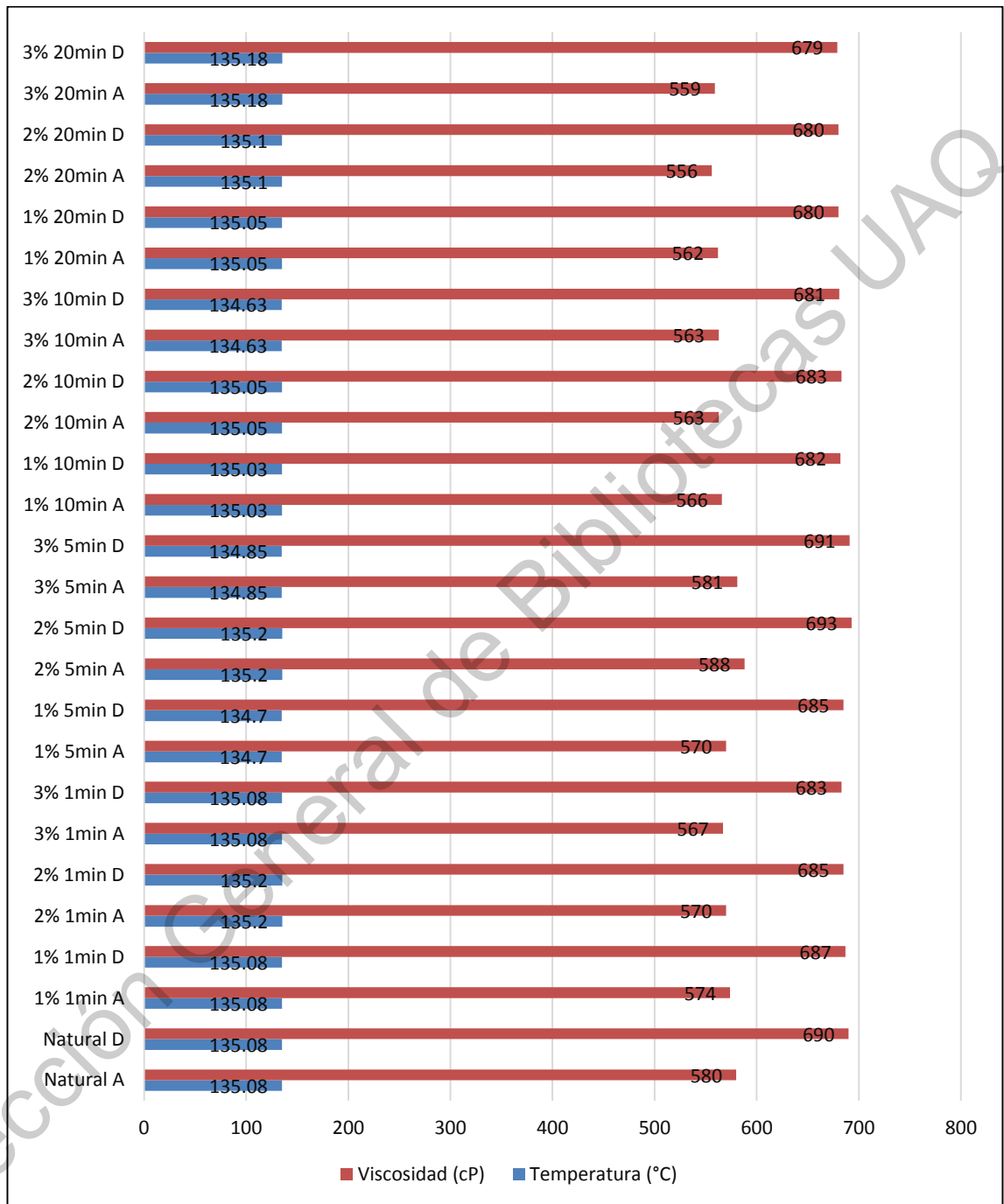
7.11 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material después del RTFO.



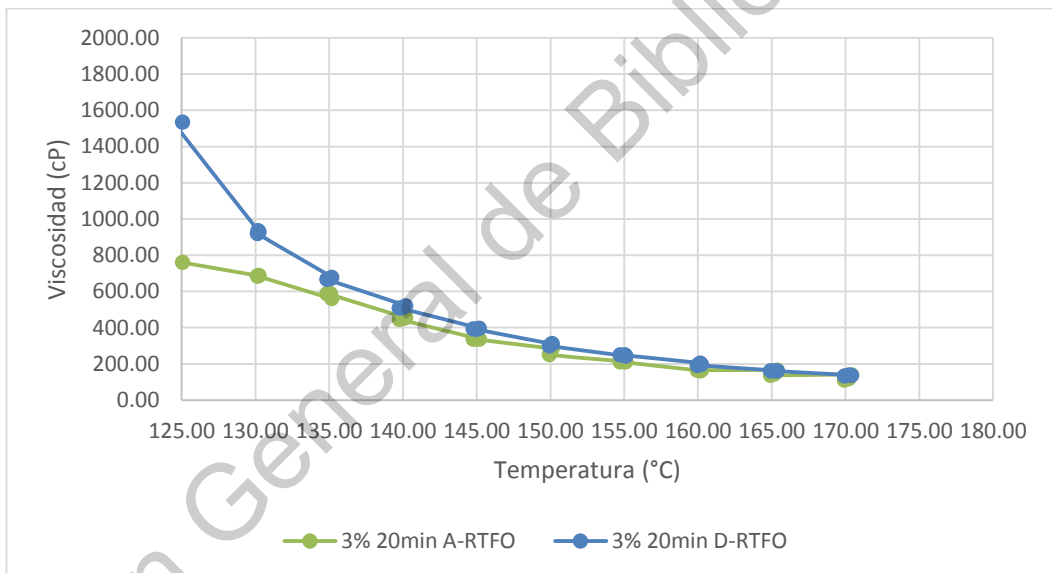
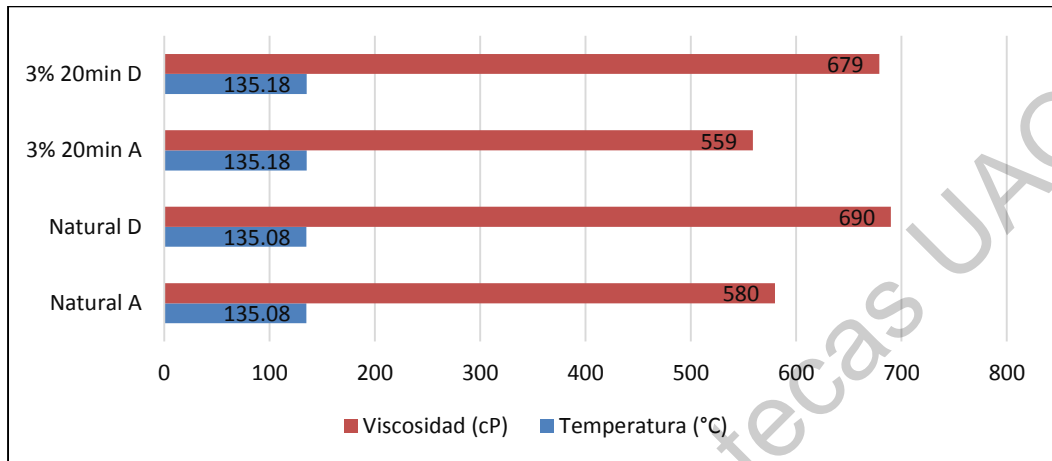
7.12 Viscosidad Rotacional Brookfield en cP para 1min de molido del material después del RTFO a 135°C.



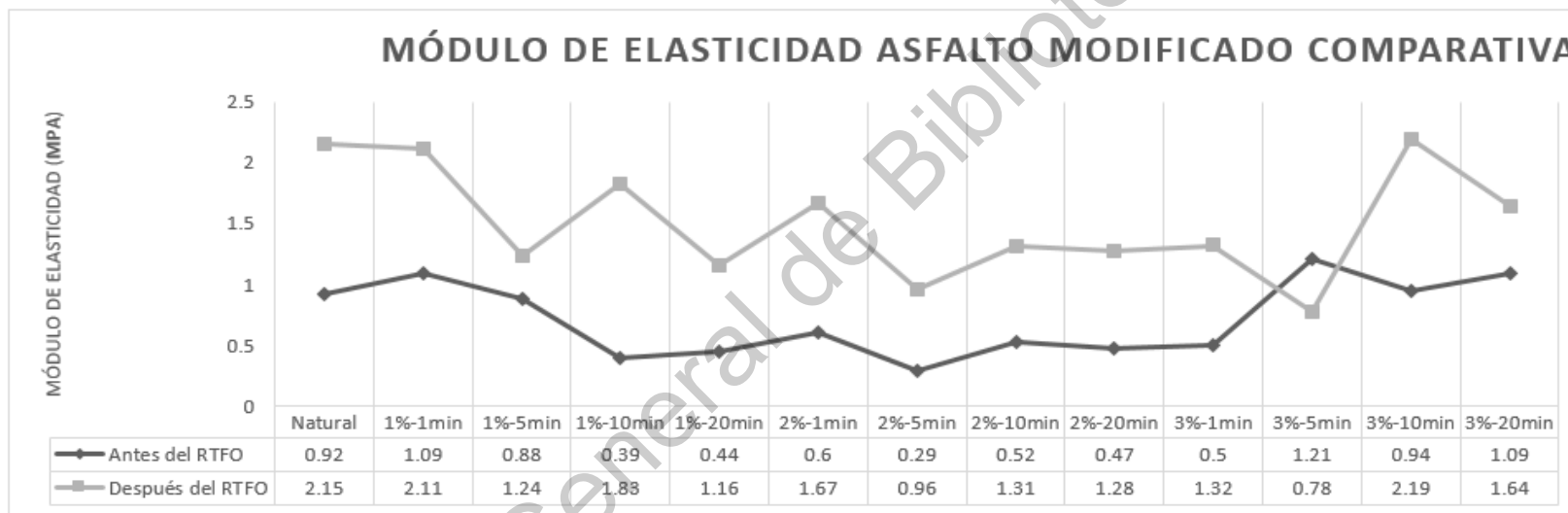
7.13 Resultados comparativos de Viscosidad Rotacional Brookfield del asfalto modificado antes y después del envejecimiento en RTFO.



7.14 Resultados comparativos de Viscosidad Rotacional Brookfield del asfalto modificado antes y después del envejecimiento en RTFO para la muestra de mejor resultado.



7.15 Resultados comparativos del módulo elástico del asfalto modificado antes y después del envejecimiento en RTFO.



7.16 Resultados comparativos del módulo dinámico del asfalto modificado antes y después del envejecimiento en RTFO.

