

**Análisis Comparativo del Comportamiento Reológico de un Asfalto Convencional y un
Asfalto Modificado con Almidón de Yuca**

Claudia Cerón Coronado

Gerardo Andrés Argote Valencia

Director

Hugo León Arenas Lozano, M.Sc.

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería de Pavimentos

Popayán

Noviembre de 2019

**Análisis Comparativo del Comportamiento Reológico de un Asfalto Convencional y un
Asfalto Modificado con Almidón de Yuca**

Claudia Cerón Coronado

Gerardo Andrés Argote Valencia

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Ingeniería de Pavimentos

Director

Hugo León Arenas Lozano, M.Sc.

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería de Pavimentos

Popayán

Noviembre de 2019

Nota de Aceptación

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Dedicatoria

*A Dios siempre presente
quien ha guiado nuestro camino y nos ha dado
la capacidad y fuerza para el logro de nuestras metas.*

*A Manuel José la mejor parte de nuestra vida juntos
como modelo y ejemplo de perseverancia y trabajo en equipo
Te amamos con el corazón.*

Agradecimientos

Queremos agradecer a todos los que hicieron posible la elaboración de este trabajo.

A nuestros padres por todo su amor, ejemplo, y apoyo incondicional en cada etapa de nuestras vidas.

A nuestra Alma Mater de la cual siempre nos sentimos orgullosos de pertenecer, a la querida Facultad de Ingeniería Civil, a nuestros profesores y en especial a nuestro director de tesis por compartir su valioso conocimiento y experiencia y por brindarnos su apoyo y orientación para alcanzar el objetivo propuesto.

A la empresa y personas que prestaron su colaboración para el desarrollo del presente trabajo

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la comparación del comportamiento reológico de un asfalto convencional y el mismo asfalto modificado con almidón de yuca, inicialmente se realizó la determinación de las propiedades físicas que permiten establecer que el almidón produce un incremento en la dureza del asfalto modificado, posteriormente se realizó la evaluación del asfalto modificado a altas temperaturas mediante el ensayo de Performance Grade, PG y se logró determinar que la modificación del asfalto con almidón de yuca mejoró en hasta dos grados el PG, los resultados mostraron un incremento en el módulo complejo G^* y el mejoramiento de la componente elástica del módulo debido a la disminución del ángulo de fase δ .

Para evaluar la resistencia a la deformación plástica del asfalto modificado con almidón de yuca se realizó el ensayo Multiple Stress Creep Recovery, MSCR mediante el cual se confirmó una disminución de la deformación permanente, lo que indicó que el asfalto modificado con almidón puede ser utilizado para pavimentos con demandas de hasta de 30 millones de ejes equivalentes o velocidades entre 20 y 70 km/h. Este trabajo de investigación es un aporte al conocimiento en razón a que no se encontró referencias anteriores.

Palabras clave: Cemento Asfáltico, Modificado, Almidón de Yuca, Performance Grade AASHTO M 320, MSCR AASHTO M 332

Abstract

This research aims to compare the rheological behavior of a conventional asphalt and the same modified one with cassava starch, the determination of the physical properties for establishing that the starch produces an increase in the hardness of the modified asphalt was initially carried out, subsequently, the evaluation of asphalt modified at high temperatures was carried out using the Performance Grade test and it was determined that the modification of asphalt with cassava starch improved the PG by up to two degrees, the results have shown an increase in the complex module G^* and the module elastic component improvement due to the phase angle decrease.

In order to evaluate the plastic deformation resistance of asphalt modified with cassava starch, the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test was carried out, confirming a decrease in permanent deformation, which indicated that starch-modified asphalt, can be used for pavements with demands of up to 30 million equivalent axes or speeds between 20 and 70 km/h. This research is a contribution to knowledge because of none previous references were found.

Keywords: Asphalt Cement, Modified, Cassava starch, Performance Grade AASHTO M 320. MSCR AASHTO M 332.

Tabla de contenido

1.	Introducción	16
2.	Definición del Problema	18
2.1.	Planteamiento del Problema	18
2.2.	Formulación del Problema	18
3.	Justificación	19
4.	Objetivos	20
4.1.	Objetivo General	20
4.2.	Objetivos Específicos	20
5.	Marco Teórico	21
5.1.	El Cemento Asfáltico	21
5.2.	El Almidón de Yuca	22
5.3.	Composición Química del Almidón	23
5.4.	La Reología	24
5.5.	Evaluación del Cemento Asfáltico con el Reómetro Dinámico de Corte DSR	25
5.6.	El Módulo Complejo G^*	26
5.7.	El Ángulo de Fase δ	26
5.8.	Evaluación del grado de desempeño (Performance Grade) del Cemento Asfáltico	26

5.9.	Evaluación de la Resistencia a la Deformación Permanente mediante la prueba del Múltiple Stress Creep Recovery (MSCR)	27
5.10.	Estado del Arte Sobre la Modificación del Cemento Asfáltico con Almidón de Yuca	30
6.	Metodología y Materiales utilizados	34
6.1.	Caracterización del Cemento Asfáltico base	35
6.2.	Selección del tipo de almidón de yuca	37
6.3.	Proceso de modificación del cemento asfáltico base con el almidón de yuca	38
6.4.	Caracterización Física y Reológica de los asfaltos modificados	46
6.4.1.	Caracterización Física.	46
6.4.2.	Caracterización reológica mediante el ensayo Performance Grade PG AASHTO M320.	47
6.4.3.	Evaluación por desempeño mediante el ensayo Multiple Stress Creep Recovery MSCR AASHTO M332.	48
7.	Análisis de los Resultados	48
7.1.	Selección de los parámetros de modificación y los Porcentajes de Almidón de Yuca Incorporado en el Cemento Asfáltico	49
7.2.	Grado de Homogeneidad y distribución del almidón de yuca en el cemento asfáltico	52
7.3.	Resultados de la Caracterización Física y Reológica de los asfaltos modificados	55
7.3.1.	Caracterización Física	55
7.3.2.	Caracterización Reológica	64

7.3.2.1. Grado de desempeño PG (Performance Grade) AASHTO M320.	64
7.3.3. Evaluación del grado de desempeño de los residuos asfálticos según el ensayo Multiple Stress Creep Recovery MSCR AASHTO M332	72
8. Conclusiones y Recomendaciones	78
9. Bibliografía	81

Lista de Tablas

Tabla 5.1 Especificación Performance Grade AASHTO M 332	29
Tabla 6.1 Caracterización del Cemento Asfáltico Artículo 410 - Especificaciones generales de construcción INVIAS 2013	36
Tabla 6.2 Características fisicoquímicas del almidón de yuca CPA	38
Tabla 6.3 Cantidades de muestras elaboradas para ensayos	44
Tabla 6.4 Caracterización del Asfalto Modificado Artículo 410 - Especificaciones generales de construcción INVIAS 2013	46
Tabla 7-1 Caracterización Física del Asfalto Modificado con Almidón. Temperatura de Mezclado 150°C	50
Tabla 7-2 Mezclas Realizadas con Variaciones en el Porcentaje de Almidón y Temperatura de Mezclad	51
Tabla 7-3 Forma y Tamaño del Almidón del Asfalto Modificado Observado en el Microscopio	54
Tabla 7-4 Caracterización Física de Asfalto Modificado con Almidón, a Temperatura de Mezclado 120 y 140°C	56
Tabla 7-5 Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado sin Envejecer	64
Tabla 7-6 Comparación de los Resultados de G^* , δ y $G^*/\text{sen } \delta$ del Asfalto Modificado a 58°C con Diferentes Porcentajes de Almidón, sin Envejecer	66
Tabla 7-7 Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT	67
Tabla 7-8 Comparación de los Resultados de G^* , δ y $G^*/\text{sen } \delta$ del Asfalto Modificado a 64°C con Diferentes Porcentajes de Almidón, Envejecido en RTFOT	69

Tabla 7-9 Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado sin Envejecer y Envejecido en RTFOT	71
Tabla 7-10 Resultados Ensayo MSCR, Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT	72
Tabla 7-11 Determinación del PG de Asfalto Original y Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT	73
Tabla 7-12 Resumen de los Resultados de los Ensayos Asfalto Original y Asfalto Modificado	77

Lista de Figuras

Figura 5.1. Superposición Tiempo – Temperatura. Fuente Instituto del Asfalto	21
Figura 5.2 Estructura molecular del Almidón. (a) Amilosa, (b) Amilopectina (Visakh & Long, 2016)	23
Figura 6.1 Organización de las pruebas realizadas sobre el cemento asfáltico y mezclas de cemento asfáltico más almidón de yuca.	35
Figura 6.2 (a) Ensayo de penetración; (b) Ensayo de punto de ablandamiento y (c) ensayo de viscosidad rotacional	36
Figura 6.3 Presentación almidón de yuca	38
Figura 6.4 (a) Dispersión del alimón en agua caliente, (b) Almidón Gelatinizado y (c) Almidón incorporado en el cemento asfáltico	39
Figura 6.5 (a) Alimón en seco y (b) Almidón incorporado en el cemento asfáltico	40
Figura 6.6 Planta piloto SOLPER modelo CVERP-50 con molino de corte coloidal	41
Figura 6.7 (a) Proceso de mezclado del cemento asfáltico y (b) Control de temperatura del asfalto antes de la adición del almidón	42

Figura 6.8 (a) Proceso de adición y mezclado del almidón y (b) Control de temperatura durante el proceso de adición del almidón	43
Figura 6.9 (a) Paso de la mezcla por el molino de corte y (b) Control de temperatura durante el proceso	43
Figura 6.10 (a) Retiro de las muestras y (b) Identificación del muestreo	44
Figura 6.11 Microscopio Marca Zeiss AxioCAm MRc de luz fluorescente.	45
Figura 6.12 Muestras de 25 mm de diámetro y 1 mm de altura de Cemento Asfáltico modificado con Almidón de yuca para los ensayos de PG y MSCR	46
Figura 6.13 Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-3	47
Figura 6.14 (a) Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-1 durante el ensayo y (b) Muestra del cemento asfáltico modificado con almidón al terminar el ensayo.	48
Figura 7-1 Grumos de Almidón Gelatinizado Formados Durante el Proceso de Mezclado	52
Figura 7-2 Dispersión del almidón en el cemento asfáltico. Mezcla 4: asfalto + 5% de almidón a 140 °C	53
Figura 7-3 Dispersión del almidón en el cemento asfáltico en forma de cruz. Mezcla 3: asfalto + 7% de almidón a 120 °C	53
Figura 7-4 Dispersión del almidón en el cemento asfáltico. Mezcla 2: asfalto + 7% de almidón a 140 °C.	54
Figura 7-5 Comparación de Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperatura de Mezclados de 120 y 140 °C	57

Figura 7-6 Comparación del Punto de Ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperaturas de Mezclado 120 y 140°C	58
Figura 7-7 Comparación de la Viscosidad a 60°C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperaturas de Mezclado 120 y 140 °C	58
Figura 7-8 Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C	61
Figura 7-9 Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C	62
Figura 7-10 Punto de Ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C	62
Figura 7-11 Punto de ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C	63
Figura 7-12 Viscosidad a 60°C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C	63
Figura 7-13 Viscosidad a 60 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C	64
Figura 7-14 PG para los Asfaltos Modificados sin Envejecer	65
Figura 7-15 Factor de Ahuellamiento – Asfalto original y Asfaltos Modificados sin Envejecer	66
Figura 7-16 Ángulo de Fase δ - Asfalto original y Asfaltos Modificados sin Envejecer	67
Figura 7-17 PG de los Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT	68

Figura 7-18 Factor de Ahuellamiento – Asfalto original y Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT	70
Figura 7-19 Ángulo de Fase δ - Asfalto original y Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT	70
Figura 7-20 PG en el punto de falla para los Asfaltos Modificados sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT	71
Figura 7-21 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Resultados Ensayo MSCR (Escala Logarítmica)	74
Figura 7-22 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Mezclados a 120°C. Resultados Ensayo MSCR	74
Figura 7-23 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Mezclados a 140°C. Resultados Ensayo MSCR	75
Figura 7-24 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Resultados Ensayo MSCR (Escala Logarítmica)	75

1. Introducción

El aumento en el transporte debido a la globalización, el incremento de la población y la mayor demanda en toda clase de productos ha elevado en gran medida al desarrollo de la infraestructura vial, haciendo necesario el uso de materiales con mayor resistencia con el fin de contar con pavimentos que brinden mayor durabilidad. Las condiciones actuales han llevado a los investigadores a buscar materiales generalmente sintéticos derivados del petróleo y de alto costo en el mercado, que modifiquen el comportamiento del asfalto como parte fundamental de las mezclas asfálticas buscando que aumenten la resistencia a la fatiga y a las deformaciones plásticas.

En los procesos de construcción, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos, las capas de rodadura y su comportamiento tiene gran incidencia económica, En Colombia y en la mayor parte del mundo, las variaciones en la calidad del asfalto inciden directamente en la calidad de las mezclas asfálticas, razón que sumada a las condiciones climáticas y las altas cargas de tráfico, generan la necesidad de controlar las características del asfalto y modificarlo, con el fin de mejorar sus propiedades reológicas y por ende su comportamiento.

Con este trabajo se busca determinar las condiciones para utilizar el almidón de yuca como biopolímero modificador del cemento asfáltico determinando experimentalmente el porcentaje a incorporar de almidón, la forma de incorporarlo y las condiciones de mezclado en cuanto a velocidad, tiempo y temperatura de incorporación del almidón.

Adicionalmente se realiza el análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado con almidón de yuca, comparadas con la especificación Colombiana para asfaltos de penetración 60–70 y la evaluación del comportamiento reológico mediante los ensayos de Performance Grade y

Multiple Stress Creep Recovery que permite determinar la resistencia a la deformación permanente.

Este trabajo es un aporte al conocimiento que abre el camino a la búsqueda de modificadores provenientes de las materias primas renovables de bajo costo y de gran aprovechamiento en los países tropicales.

2. Definición del Problema

2.1. Planteamiento del Problema

En Colombia, la producción de asfaltos ha sido controlada por las políticas económicas del gobierno que buscan obtener un mayor beneficio del petróleo y sus derivados, razón por la cual los crudos son llevados a procesos más exigentes de refinación para obtener derivados que reporten mayores ingresos al país, dejando a los asfaltos con mínimas propiedades químicas y físicas indispensables para el buen desempeño en la utilización como ligante en mezclas asfálticas (Arenas Lozano, 2013).

Consecuencialmente, la calidad del asfalto ha generado problemas de baja durabilidad y mal comportamiento en los pavimentos, los cuales se reflejan en daños prematuros que generan un incremento en los costos de construcción, mantenimiento y rehabilitación.

Con el fin de analizar el comportamiento del asfalto y hacerlo más durable, más resistente y menos deformable, actualmente, empresas privadas y universidades invierten recursos en investigación para obtener mejoras en su comportamiento con la adición de diferentes compuestos minerales, polímeros, materiales reciclados o biopolímeros como el almidón de yuca y fibras entre otros.

Mediante el presente trabajo se busca determinar las condiciones para utilizar un material natural de bajo costo y disponible en el mercado, como modificador, en este caso el almidón de yuca y realizar un análisis del comportamiento reológico del asfalto modificado con almidón de yuca, para compararlo con el del asfalto convencional.

2.2. Formulación del Problema

¿Cuáles son las ventajas en el comportamiento reológico de los asfaltos modificados con almidón de yuca, comparadas con un asfalto convencional?

3. Justificación

En los procesos de construcción y rehabilitación de pavimentos, el factor económico de mayor incidencia es el de las capas de mezclas asfálticas dado que cuando el comportamiento de dichas mezclas es diferente al comúnmente deseado o esperado, se causan pérdidas económicas para el Estado para el contratista y para los usuarios.

Este tipo de comportamientos indeseados o inesperados pueden ocurrir por variaciones en la calidad del asfalto utilizado, que se puede originar, entre otros, en el proceso de refinación del crudo de petróleo, en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica o en el proceso de extensión y compactación de la misma; el primero no es directamente controlable por el constructor mientras que los dos últimos procesos pueden ser controlados, con el fin de minimizar los errores en el cumplimiento de las especificaciones de construcción.

El proceso de refinación involucra factores como el origen del crudo y las políticas económicas del gobierno en la obtención de mayores beneficios económicos con el uso del crudo, que llevan a obtener un residuo de muy bajas propiedades reológicas como ligante asfáltico (Arenas Lozano, 2013). En las últimas décadas, el asfalto producto de la refinación ha sido modificado con el fin de mejorar su comportamiento y propiedades reológicas. Los modificadores utilizados para dicho propósito, en su mayoría, son compuestos minerales y polímeros derivados del petróleo de alto costo.

En este trabajo se busca determinar las condiciones para utilizar el almidón de yuca, analizar el comportamiento reológico de un asfalto modificado y evaluar los beneficios que se obtienen mediante la utilización del almidón de yuca como modificador natural y de bajo costo, que podrá generar adicionalmente beneficios económicos tanto en la construcción y

mantenimiento de los pavimentos asfálticos como en la población que cultiva y procesa la yuca para la obtención del almidón.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar y comparar el comportamiento reológico de un asfalto modificado con almidón de yuca y un cemento asfáltico convencional, mediante la determinación del módulo complejo G^* , el ángulo de fase δ y la resistencia a la deformación permanente.

4.2. Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros de tiempo y velocidad de mezclado del almidón de yuca incorporado en el cemento asfáltico.
- Determinar el módulo complejo G^* , el ángulo de fase δ y la resistencia a la deformación permanente del asfalto convencional y del asfalto modificado con el almidón de yuca, mediante ensayos con el reómetro dinámico de corte (DSR).
- Comparar los resultados obtenidos del módulo complejo G^* , el ángulo de fase δ y la resistencia a la deformación permanente del asfalto convencional y del asfalto modificado con el almidón de yuca, mediante ensayos con el reómetro dinámico de corte (DSR).

5. Marco Teórico

5.1. El Cemento Asfáltico

Es el residuo proveniente de la refinación del crudo de petróleo sin ningún tipo de modificador, elaborado para satisfacer las especificaciones establecidas para utilizarlo como material de pavimentación (Sánchez Sabogal & Campagnoli Martínez, 2016).

El cemento asfáltico es un material visco-elástico, que a altas temperaturas se comporta como un fluido y a bajas temperaturas se comporta como un material sólido. A altas temperaturas actúa como un fluido newtoniano y cuando cambia la velocidad de corte actúa como un fluido no newtoniano. El comportamiento del flujo depende de la temperatura, la carga y el tiempo; un cemento asfáltico puede fluir durante 1 hora a 60 °C lo mismo que en 10 horas a 25°C, es decir, el tiempo y la temperatura están relacionados en la medición del flujo, este concepto se conoce como superposición de tiempo-temperatura (ver Figura 5.1) y se aplica a materiales viscoelásticos lineales.

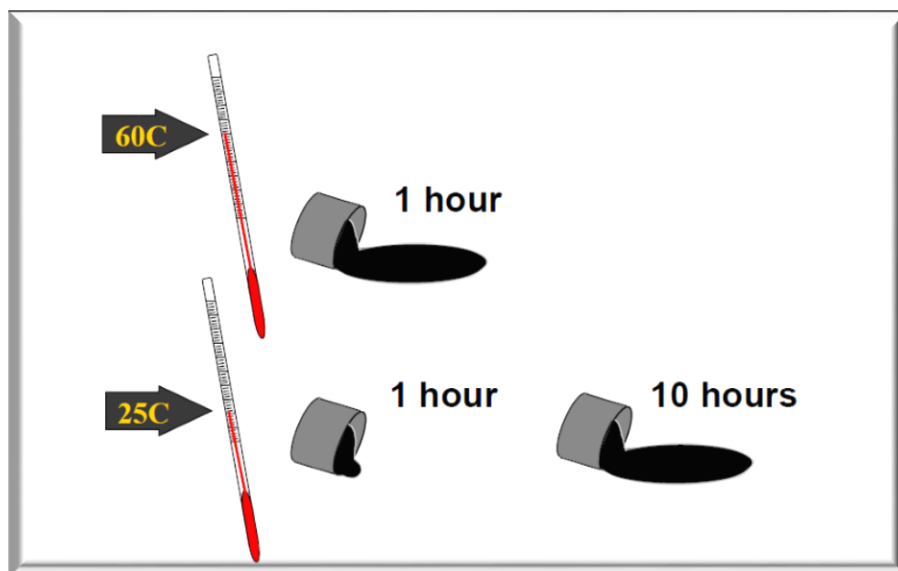


Figura 5.1. Superposición Tiempo – Temperatura. Fuente Instituto del Asfalto

Químicamente el cemento asfáltico es una mezcla completa de un gran número de diferentes compuestos orgánicos de alto peso molecular cuya composición depende del crudo

original y de los procesos de mezclado y refinación. La separación química está basada en cuatro clases de componentes:

- **Asfaltenos:** Son sólidos de color negro, que contienen generalmente carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre, de alto peso molecular y altamente polares.
- **Resinas,** Son sólidos y semisólidos de color oscuro, que contienen fenoles y ácidos carboxílicos, de alto peso molecular y alto poder adhesivo.
- **Saturados:** Son hidrocarburos alifáticos de cadena lineal y ramificada, esta fracción constituye entre el 5% y el 20% en peso del cemento asfáltico.
- **Aromáticos:** Son componentes policíclicos aromáticos y naftenos, de alto peso molecular.

La resinas, saturados y aromáticos forman la parte de los máltenos que junto con las asfáltenos conforman las dos fases del cemento asfálticos (Anderson, 2011).

5.2. El Almidón de Yuca

El almidón es un material totalmente biodegradable en diferentes ambientes el cual ha permitido el desarrollo de productos degradables para diferentes mercados. La desintegración de productos derivados del almidón puede reciclar el carbono atmosférico atrapado en las plantas productoras de fécula. Se conocen del almidón otras aplicaciones adicionales a la alimenticia tales como, adhesivos, textiles, papel y en la industrial biomédica (Sharma & Mudhoo, 2011).

El almidón está compuesto por dos tipos de moléculas, la amilosa y la amilopectina, cuyas proporciones varían de acuerdo con el origen del almidón, el contenido de amilosa varía generalmente entre el 10% y 20% y la amilopectina varía entre 80 y 90%. La amilosa es soluble en agua y aparece como una estructura helicoidal, mientras que las amilopectinas son estructuras de cadenas helicoidales cristalizadas que hacen que el almidón se produzca como gránulos los

cuales muestran propiedades hidrófilas e intermoleculares mediante enlaces de hidrógeno formados por los grupos hidroxilo en la superficie de los gránulos. El almidón puede formar películas con propiedades mecánicas adecuadas (alto porcentaje de elongación, tracción, y resistencia a la flexión) cuando es mezclado con materiales que lo modifican químicamente o cuando es modificado con materiales como el glicerol, poliésteres, urea y otros componentes polihidroxi de bajo peso molecular (Sam, Nuradibah, Chin, & Hani, 2016).

5.3. Composición Química del Almidón

El almidón es un polisacárido que contiene unidades de D-glucosa y dos biomacromoléculas, amilosa y amilopectina. La estructura de la amilosa depende del origen botánico.

Las biomacromoléculas sólo se pueden observar después de la separación seguida de la solubilización de los gránulos, la amilosa es predominantemente lineal y puede tener un grado de polimerización, la amilopectina es ramificada siendo el mayor componente de los gránulos con un alto peso molecular, es uno de los más largos polímeros naturales. (Ver Figura 5.2)

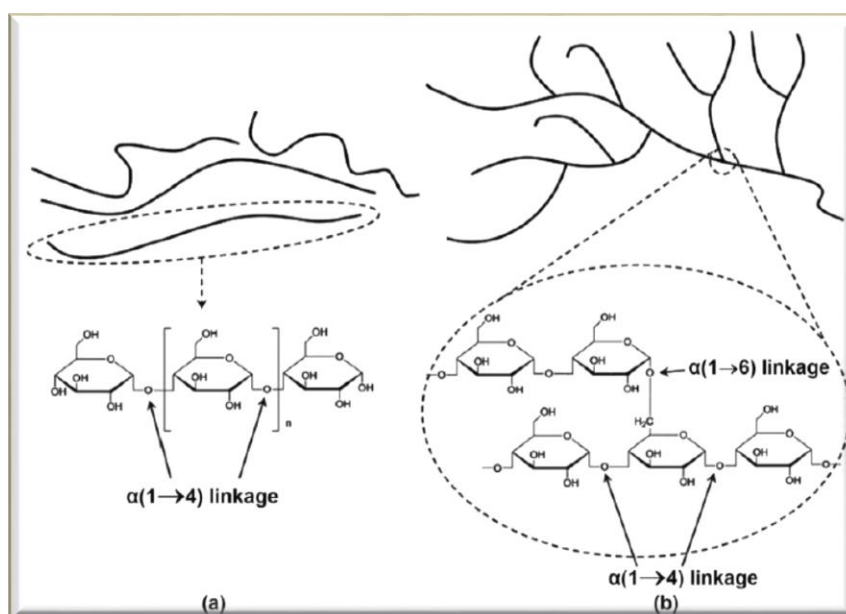


Figura 5.2 Estructura molecular del Almidón. (a) Amilosa, (b) Amilopectina (Visakh & Long, 2016)

La Amilosa tiene un peso molecular de aproximadamente 1×10^5 a 1×10^6 y tiene un número de grado de polimerización DPn de 324 a 4920, con ramificaciones entre 9 y 20 que equivalen a cadenas de moléculas. Cada cadena contiene aproximadamente entre 200 y 700 residuos de glucosa, equivalentes a un peso molecular entre 32,400 y 113,400.

La amilopectina es una molécula mucho más grande que la amilosa, con un peso molecular entre 1×10^7 y 1×10^9 y una estructura ramificada más pesada, el DPn tiene un rango entre 9,600 y 15,900 (Visakh & Long, 2016).

Respecto a los porcentajes de amilosa y amilopectina en el almidón de yuca se encontró una variación en sus proporciones de acuerdo a lo descrito por los siguientes autores: (Breuninger, Piyachomkwan, & Sriroth, 2009) reportan un porcentaje de 17% de amilosa y se calcula un 83% de amilopectina, mientras que (Visakh & Long, 2016) presentan un 28% de amilosa respecto al 72% de amilopectina.

Algunos investigadores proponen que existen variaciones, como el comportamiento en el proceso de gelatinización, que dependen de su origen botánico, en algunos casos, la siembra, la estación en la que crece y la edad de las raíces, pueden afectar las propiedades del almidón de yuca (Breuninger et al. 2009).

5.4. La Reología

La Reología es el estudio de la deformación y el flujo mediante el cual se puede conocer el comportamiento elástico y viscoso del cemento asfáltico cuando se somete a una carga. En el presente trabajo se utilizó el reómetro dinámico de corte (DSR) que sirve para medir las propiedades de flujo del cemento asfáltico a altas temperaturas que oscilan alrededor de 10 a 82°C.

5.5. Evaluación del Cemento Asfáltico con el Reómetro Dinámico de Corte DSR

El propósito principal de una prueba DSR es determinar el comportamiento para que el cemento asfáltico este correctamente especificado y tenga las propiedades ingenieriles adecuadas a altas temperaturas, y cuando se utilice en una mezcla asfáltica en caliente evite que esta se deforme o se desplace bajo la acción del tráfico.

La prueba en el DSR, es de torsión en la cual una muestra delgada de cemento asfáltico entre dos placas circulares es sometida a esfuerzos de corte. También es una prueba dinámica de corte, lo que significa que la muestra al ser sometida a un ciclo de carga muy rápido hacia atrás y hacia adelante produce un esfuerzo de corte. Es una prueba a alta temperatura, con placas de acero de 25 mm de diámetro, donde la muestra tiene 1 mm de espesor; cuando la prueba se realiza a temperaturas mucho más bajas, se utilizan placas de 8 mm de diámetro con un espesor de muestra de 2 mm. El esfuerzo aplicado varía dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico. El ensayo se realiza a diferentes temperaturas, dependiendo de la dureza del cemento asfáltico.

El ensayo del cemento asfáltico en el DSR mide el módulo complejo G^* y el ángulo de fase δ . El módulo es una medida de la rigidez y el ángulo de fase es una medida de que tan fluido es el material (NCHRP, 2011).

El valor del módulo se llama el módulo dinámico de corte, abreviado con el símbolo G^* . La "G" indica que el módulo es un valor de corte y el "*" indica que se trata de un módulo dinámico. Un valor alto de módulo, corresponde a un cemento asfáltico rígido.

Los Materiales que se comportan como un sólido elástico, se recuperan rápidamente después de aplicar la carga, este tipo de materiales tienen un ángulo de fase cercano a cero. Cuando el material tiene un comportamiento viscoso, el ángulo de fase es cercano a 90° . Si un

material tiene un ángulo de fase alto al ser cargado se deforma, y al descargarlo quedará deformado, es decir no recupera su forma inicial.

En la prueba DSR a alta temperatura, la cantidad especificada es $G^*/\text{seno } \delta$ en unidades de kPa. Usando ambos parámetros G^* y $\text{seno } \delta$, la rigidez y la elasticidad del cemento asfáltico son controlados simultáneamente. Cementos asfálticos rígidos, elásticos tienen un mayor valor $G^*/\text{seno } \delta$ que cementos asfálticos suaves, fluidos (NCHRP, 2011).

5.6. El Módulo Complejo G^*

Es la medida de la resistencia total a la deformación de un material cuando se somete a un esfuerzo de corte de tipo sinusoidal. Tiene dos componentes una elástica y una viscosa (The Asphalt Handbook MS-4, 2007).

Para materiales realmente viscoelásticos, el módulo complejo y el ángulo de fase dependen de la frecuencia, en la prueba para obtener las curvas maestras se requiere realizar un barrido a diferentes frecuencias.

5.7. El Ángulo de Fase δ

Es un indicador de las cantidades relativas de las componentes viscosa y elástica del módulo complejo G^* (The Asphalt Handbook MS-4, 2007). En el ensayo de prueba de esfuerzo controlado, corresponde al desfase que ocurre entre el esfuerzo aplicado y la aparición de la deformación resultante.

5.8. Evaluación del grado de desempeño (Performance Grade) del Cemento

Asfáltico

El Grado de Desempeño de un cemento asfáltico hace parte de SUPERPAVE, con el cual se establece un sistema de clasificación y selección de un asfalto en función de las condiciones climáticas y de las condiciones del lugar. Dichas condiciones están relacionadas a las

temperaturas de diseño de pavimento que permiten calcular las propiedades de flujo y deformación a determinados rangos de carga (Anderson, 2011).

El grado de desempeño, incluye los siguientes equipos de ensayos, viscosímetro rotacional, reómetro de corte dinámico, el reómetro de viga a flexión, y el ensayo de tensión indirecto, estos dos último para medir las propiedades a bajas temperaturas. En el presente trabajo, dadas las condiciones climáticas del trópico, solo se realizó el análisis a altas temperaturas, con el fin de determinar la resistencia a la deformación plástica.

La especificación de ensayo PG (AASHTO, 2015) establece los siguientes parámetros de control a alta temperatura:

- Para cementos asfálticos sin envejecer $G^*/\text{seno } \delta \leq 1.00 \text{ kPa}$.
- Para cementos asfálticos envejecidos en RTFOT $G^*/\text{seno } \delta \leq 2.20 \text{ kPa}$.

Los ensayos se realizan a una frecuencia de 10 rad/segundo lo que simula una velocidad de los vehículos comerciales de 45 km/h.

5.9. Evaluación de la Resistencia a la Deformación Permanente mediante la prueba del Múltiple Stress Creep Recovery (MSCR)

La Resistencia a la deformación permanente se obtiene mediante el ensayo MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) que utiliza el concepto de prueba de recuperación y fluencia establecida para evaluar el potencial del cemento asfáltico para la deformación permanente usando el reómetro dinámico de corte (DSR). El ensayo MSCR, a altos niveles de esfuerzo y deformación aplicados al cemento asfáltico, representan mejor lo que ocurre en un pavimento (NCHRP, 2010).

Mediante el uso de los altos niveles de esfuerzo y deformación en el ensayo MSCR, la respuesta del cemento asfáltico captura no sólo los efectos de la rigidez del polímero, sino

también los efectos elásticos retrasados (donde el cemento asfáltico se comporta como una banda elástica). El ensayo MSCR consiste en una serie de ciclos de 1 segundo de carga de fluencia (a esfuerzo constante) seguida por 9 segundos sin carga para que la muestra pueda recuperarse. Las muestras son cargadas 10 ciclos de carga de fluencia de 0.1 y 3.2 kPa, a la temperatura PG del cemento asfáltico. (Anderson, 2011)

Un cemento asfáltico sin modificar por lo general tiene baja elasticidad y, en consecuencia, no recupera la mayor parte de la deformación causada por el esfuerzo de la carga durante el período de descanso de 9 segundos. Esto resulta en una curva que se asemeja a escalones, con subidas verticales durante el período de carga de 1 segundo y mesetas horizontales durante el tiempo de descanso de 9 segundos. Los cementos asfálticos sin modificar acumulan tensión no recuperada durante el ensayo MSCR. Los Cementos asfálticos que han sido modificados con elastómeros, típicamente recuperan casi la totalidad de la deformación de corte en las mismas condiciones durante los períodos de descanso. Al final de la prueba MSCR se obtiene el total no recuperado del cemento asfáltico en cada nivel de esfuerzo aplicado J_{nr} .

Para cada nivel de esfuerzo, la cantidad total de deformación no recuperada γ_u se calcula utilizando la ecuación 1 (NCHRP, 2010):

$$\gamma_u = \varepsilon_{10} - \varepsilon_0 \quad (1)$$

Dónde:

ε_{10} : Deformación al final de los 10 ciclos.

ε_0 : Deformación al inicio del primer ciclo.

Para cada nivel de esfuerzo, J_{nr} es calculado usando la ecuación 2:

$$J_{nr} = \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (2)$$

Dónde:

γ_u : Deformación no recuperada.
 τ : Esfuerzo aplicado en Pa.

Un asfalto podrá ser aceptado siempre y cuando cumpla con las exigencias que han sido definidas mediante la clasificación de niveles de tráfico de acuerdo con la Tabla 5.1 la cual corresponde a la Tabla 1 de la norma AASHTO M 332; así, un asfalto será seleccionado dependiendo de las condiciones del clima y ejes equivalentes considerados en el proyecto. En este trabajo se realizó la determinación del Performance Grade mediante el ensayo MSCR a altas temperaturas utilizando la parte correspondiente al performance grade original y los resultados obtenidos en el ensayo de MSCR.

Tabla 5.1 Especificación Performance Grade^a AASHTO M 332

Performance Grade	PG 46			PG 52						PG 58					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<46			<52						<58					
Min pavement design temp, °C ^b	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Flash point temp, T 48, min °C	<i>Original Binder</i>														
Flash point temp, T 48, min °C	230														
Viscosity, T 316: max 3 Pa·s, test temp, °C	135														
Dynamic shear, T 315: ^d G*/sinδ, min 1.00 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58					
Mass change, max, percent ^f	<i>Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)</i>														
Mass change, max, percent ^f	1.00														
MSCR, T 350: Standard Traffic "S" Jnr 3.2, max 4.5 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Heavy Traffic "H" Jnr 3.2, max 2.0 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic "V" Jnr 3.2, max 1.0 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic "E" Jnr 3.2, max 0.5 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	46			52						58					

a: MSCR testing on RTFO residue should be performed at the PG grade based on the environmental high pavement temperature. Grade bumping is accomplished by requiring a lower Jnr value while testing at the environmental temperature.

b: Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35, excluding the provisions for "grade bumping."

c: This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

d: For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G*/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

e: G*/sinδ = high temperature stiffness and G* sinδ = intermediate temperature stiffness.

f: The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.1

Especificación Performance Grade ^a AASHTO M 332 (continuación)

Performance Grade	PG 64						PG 70					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<64						<70					
Min pavement design temp, °C ^b	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
<i>Original Binder</i>												
Flash point temp, T 48, min °C	230											
Viscosity, T 316: ^c max 3 Pa·s, test temp, °C	135											
Dynamic shear, T 315: ^d G*/sinδ, min 1.00 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	64						70					
<i>Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)</i>												
Mass change, max, percent ^f	1.00											
MSCR, T 350: Standard Traffic “S” Jnr 3.2, max 4.5 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Heavy Traffic “H” Jnr 3.2, max 2.0 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic “V” Jnr 3.2, max 1.0 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic “E” Jnr 3.2, max 0.5 kPa ⁻¹ Jnr diff, max 75% test temp, °C	64						70					

a: MSCR testing on RTFO residue should be performed at the PG grade based on the environmental high pavement temperature. Grade bumping is accomplished by requiring a lower Jnr value while testing at the environmental temperature.

b: Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35, excluding the provisions for “grade bumping.”

c: This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

d: For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G*/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

e: G*/sinδ = high temperature stiffness and G* sinδ = intermediate temperature stiffness.

f: The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

(Fuente AASHTO M 332-14 Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification)

5.10. Estado del Arte Sobre la Modificación del Cemento Asfáltico con Almidón de Yuca

El almidón de yuca es utilizado en muchas aplicaciones en la industria de alimentos al igual que en la fabricación de adhesivos, papel, textiles, cosméticos y elementos biomédicos

entre otros. En relación con el cemento asfáltico, existen pocas investigaciones sobre ensayos donde se utiliza cemento asfáltico más almidón

A nivel Internacional se han encontrado dos estudios en los cuales se ha utilizado el almidón como modificador de cemento asfáltico. El estudio más amplio, corresponde al realizado en la universidad de Mosul en Iraq y la Facultad de Ciencias del Transporte e Ingeniería del Instituto de Tecnología de Harbin, Heilogjiang, en China (Ai, Tan, & Ayman, 2010). Este estudio se tomó como referencia inicial para realizar las mezclas de asfalto modificado con almidón.

En las mezclas hechas en el estudio se indicó que al almidón se le debe realizar un proceso de modificación física llamado gelatinización el cual consiste en calentar agua a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para adicionarla al almidón en un porcentaje entre el 25% y 27% del peso de este, dicho proceso hace que los gránulos de almidón se inflen al absorber agua. No se debe seguir calentando la mezcla porque a mayor temperatura la gelatinización colapsa.

Las pruebas de laboratorio realizadas en cementos asfálticos y en mezclas asfálticas modificadas con almidón arrojan buenos resultados comparados con polímeros sintéticos como el SBS. Entre los resultados obtenidos se encontraron:

- Los valores de índice de penetración indican que el almidón reduce la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico, para el asfalto virgen el IP tiene un valor de -2.447 y la mezcla de asfalto modificado con el 5% de almidón presentó un valor de 0.
- La resistencia a la tracción indirecta de las mezclas que contienen el almidón aumentó su resistencia, en estado húmedo la resistencia a tracción indirecta es para la mezcla SMA de control 0.356 MPa y la mezcla SMA con 5% almidón es 0.882 MPa, es decir 2.48

veces mayor. Esto indica que este tipo de aditivo puede ser utilizado como aditivo mejorador de adherencia.

- Los resultados del ensayo de Wheel Tracking muestran mayor resistencia a la deformación plástica en las mezcla con almidón, la mezcla SMA con 5% de almidón tiene un valor de 0.0349 mm/min comparado con la mezcla de control con un valor de 0.094 mm/min. Los resultados de resistencia a la flexión también muestran mayor módulo de rotura en las mezclas con almidón, la mezcla SMA con 5% de almidón tiene un valor de 0.522 MPa comparado con la mezcla de control con un valor de 0.366 MPa indicando que la resistencia al ahuellamiento y el fisuramiento a baja temperatura de las mezclas SMA con almidón son mejores que las mezclas de control.
- El uso de almidón en mezclas asfálticas, causa un incremento en los valores del módulo resiliente a temperaturas de 25 °C. El valor de módulo resiliente de laboratorio para la mezcla de control es 1,468 MPa comparado con 2,021 MPa de la mezcla con asfalto modificado con 5% de almidón. El valor calculado de acuerdo a las propiedades del ligante y el volumen de concentración de los agregados para la mezcla de control es 1,531 MPa comparado con 2,594 MPa de la mezcla con asfalto modificado con 5% de almidón. Los análisis de los datos presentados indican que el valor de módulo resiliente de laboratorio es menor que el calculado.
- El cemento asfáltico con almidón, tiene buena resistencia al ataque químico de los combustibles.

Los resultados confirman que el almidón es un biopolímero modificador de cemento asfálticos con buen comportamiento y a un precio más bajo (Ai et al. 2010).

El segundo estudio fue elaborado en la Facultad de Ciencias del Transporte e Ingeniería del Instituto de Tecnología de Harbin, Heilogjiang, en China (Ai & Tan, 2009), donde realizaron una serie de ensayos para evaluar el comportamiento de sellos para juntas de losas de concreto haciendo una evaluación de campo después de 12 y 18 meses de instalados en la provincia de Heilogjiang en el norte de China. Los resultados indicaron que los sellantes cumplieron las normas ASTM D1191, D6690-06a y D3405, la evaluación de campo reveló que el sellante con almidón para juntas, tipo 2, es un material confiable para el tratamiento de grietas, adicionalmente se pudo concluir que el almidón representó un material ideal como un modificador de cemento asfáltico, basado en las siguientes razones:

- El ensayo de tracción uniaxial demostró que incrementando la cantidad de almidón hasta el 30%, aumentó el máximo esfuerzo de tensión y se disminuyó el módulo secante. Bajando la temperatura, disminuyó el esfuerzo máximo de tensión y aumentó el módulo secante.
- En el estudio de campo, se encontró que la longitud de grietas, en cantidad y porcentaje transversal fallada después de un año y medio fue de 0.01% y 0% respectivamente. El sellante tiene un buen comportamiento en relación con SHRP.
- Los resultados de los ensayos de penetración y flujo, indicaron que los sellos de juntas con asfalto modificado con almidón proveen una superficie firme, suave y sin fisuración en primavera y mantienen flexibilidad en invierno.

En dicho estudio también se recomendó el asfalto modificado con almidón para sellar grietas horizontales e inclinadas en autopistas, aeropuertos, y puentes, así como para pisos de interiores, pisos industriales, parqueaderos y hangares sin el uso de un *primer* para la instalación (Ai & Tan, 2009).

En el artículo de Ai et al. 2010, no se indicó el tipo de almidón utilizado y tampoco se realizó una evaluación reológica al asfalto modificado, lo que representa una oportunidad para el presente trabajo con el que se busca obtener los parámetros reológicos con un tipo de almidón que puede aportar a la ingeniería de Pavimentos y la agroindustria del país.

6. Metodología y Materiales utilizados

En este capítulo se describen los procedimientos de caracterización física de los materiales utilizados y la metodología de prueba empleada para la elaboración de las mezclas y obtención de resultados.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el Laboratorio de la Planta de Asfalto de la empresa Humberto Quintero - HQ ubicada en el kilómetro 30 de la Vía Barrancabermeja – Bucaramanga, en el Departamento de Santander – Colombia.

El diagrama de flujo de la Figura 6.1 muestra la organización del programa experimental desarrollado durante el trabajo.

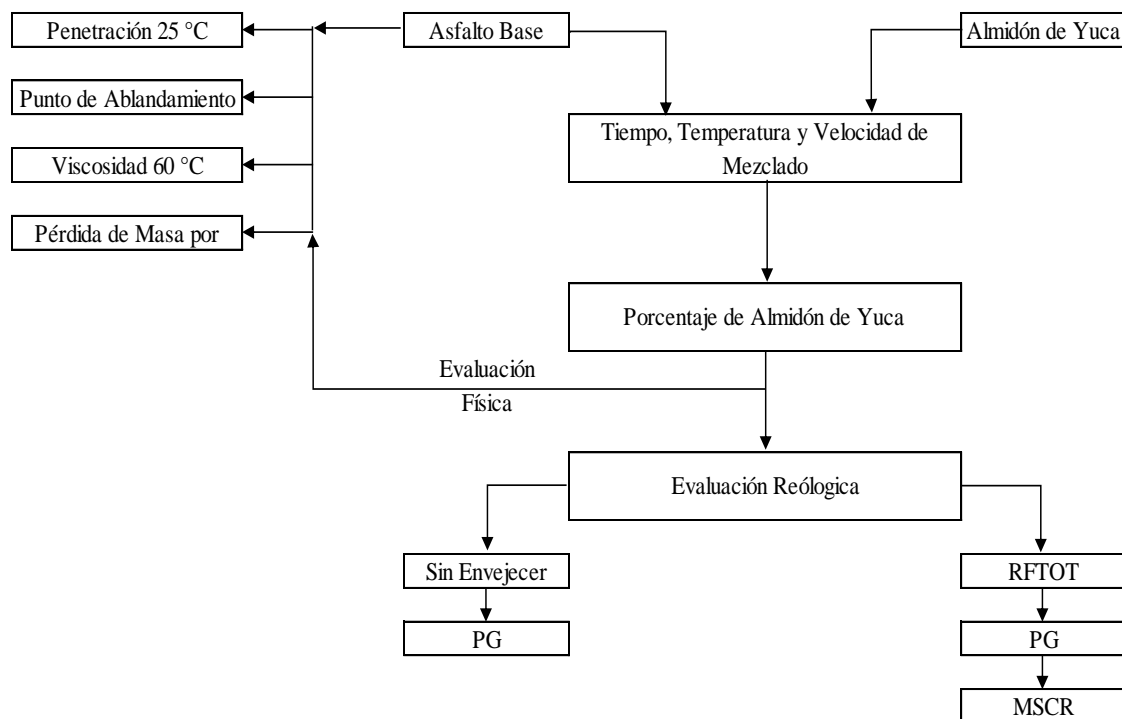


Figura 6.1 Organización de las pruebas realizadas sobre el cemento asfáltico y mezclas de cemento asfáltico más almidón de yuca.

El presente trabajo se llevó a cabo mediante el desarrollo de las actividades descritas a continuación:

6.1. Caracterización del Cemento Asfáltico base

Con el fin de garantizar la homogeneidad del ligante utilizado para la mezcla con el almidón de yuca, se utilizó cemento asfáltico de una producción de Ecopetrol en la refinería de Barrancabermeja al cual se le realizaron los ensayos básicos para la caracterización física que se encuentran establecidos en el artículo 410-13 (ver Figura 6.2) de las Especificaciones Generales de Construcción INVIAS 2013.

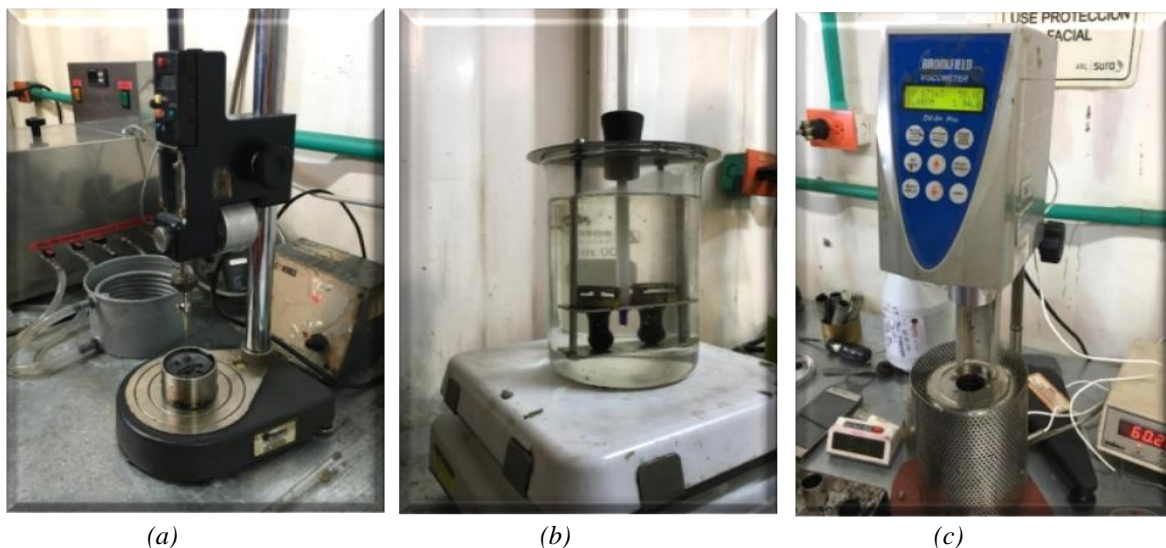


Figura 6.2 (a) Ensayo de penetración; (b) Ensayo de punto de ablandamiento y (c) ensayo de viscosidad rotacional

El cemento asfáltico utilizado se clasificó como de grado de penetración 60 - 70 y cumplió con los requisitos de la especificación Colombiana indicada en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1

Caracterización del Cemento Asfáltico Artículo 410 - Especificaciones generales de construcción INVIAS 2013

Art. 410 - INVIAS 2013	Norma de Ensayo	GRADO DE PENETRACION 60 - 70		ASFALTO BASE
		MIN	MAX	
Asfalto original				
Penetración (25°C,100g,5s), 0.1mm	E-706	60	70	67.6
Punto de ablandamiento, °C	E-712	48	54	48.3
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-0.92
Viscosidad absoluta (60°C), P	E-717	1,500		1,980
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720				
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0.8	0.14

Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	50	-	60.7
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	9	5.9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-717	-	4	3.4

6.2. Selección del tipo de almidón de yuca

Para la selección del almidón de yuca se consultó con el Ph.D. Héctor Samuel Villada, profesor e investigador de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, quién ha sido participe en el desarrollo de diferentes estudios de las especies de yuca en el Departamento del Cauca y otras regiones del territorio nacional y ha investigado diferentes especies en Suramérica, orientando sobre el tipo de almidón de yuca utilizado a nivel industrial y alimenticio para el desarrollo de bioempaques y su uso como como un potencial modificador de cemento asfáltico, haciendo énfasis en que, el almidón debe provenir de una sola especie de yuca garantizando con ello un alto grado de homogeneidad en sus características.

De acuerdo a lo consultado se revisaron los almidones disponibles, encontrando que la producción de almidón en el Departamento del Cauca y en general en el País no se obtiene de una sola especie de yuca y debido a que el proceso de fabricación es artesanal no es posible obtener un almidón homogéneo. Por esta razón después de realizar una búsqueda por internet de fábricas y proveedores que tengan el desarrollo industrial para trabajar una sola especie de yuca y la capacidad de suministrar cantidades suficientes de almidón para utilizarlo como modificador, se decidió utilizar almidón producido en la Ciudad de Vaquería - Caaguazú- Paraguay, de marca CPA SAE (Compañía Procesadora de Productos Agrícolas SAE, Figura 6.3), industria procesadora de almidón de yuca que acopia a pequeños y medianos productores de la zona. Este almidón se consigue en Colombia a través de la empresa POLTEC S.A.S (Alimentos

y productos en polvo SAS), especialistas en elaboración de almidones y productos derivados del almidón para mejorar la textura de los alimentos, ubicada en La Estrella – Antioquia.



Figura 6.3 Presentación almidón de yuca

El almidón en cuanto a su composición presenta las características fisicoquímicas indicadas en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2
Características fisicoquímicas del almidón de yuca CPA

Certificado de Producción 160829
Producto: Almidón nativo de yuca

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Viscosidad (BU)	553	520	570
Punto de gelificación (°C)	66	54	70
Humedad (%)	12	-	13.5
Cenizas (%)	0.5	-	0.50
pH en solución	6.5	5.0	8.00
E. Coli (UFC/g)	<10	0.0	<10
Hongos y Levaduras (UFC7g)	<10	100.0	1000.00
Recuento Total mesofilos (UFC/g)	640	10000.0	50000.00
Determinación de Salmonella en 25 gr	Ausencia	Ausencia	-

(Fuente Importador Poltec SAS. Email: info@poltecsas.com)

6.3. Proceso de modificación del cemento asfáltico base con el almidón de yuca

Seleccionados el cemento asfáltico y el almidón de yuca se procedió a la determinación de los parámetros de modificación y a la elaboración de los asfaltos modificados con distintos porcentajes de almidón.

Inicialmente se realizaron mezclas de prueba, las cuales se describen más adelante, con porcentajes de almidón respecto al peso del ligante asfáltico de 2%, 3%, 4% y 5% eligiendo dos temperaturas de mezclado de 100°C y 150°C, añadiendo el almidón en seco. Con estos porcentajes de almidón y temperaturas elegidas, no fue posible obtener buenos resultados.

De acuerdo con las pruebas de mezclado iniciales y siguiendo las referencias bibliográficas se definieron nuevas mezclas de prueba con porcentajes de almidón respecto al peso del ligante asfáltico de 5%, 7% y 9% a temperaturas de mezcla de 120 °C y 140°C probando dos formas de involucrar el almidón dentro del asfalto a saber:

- Añadiendo el Almidón Gelatinizado. Mediante dilución en agua se realizó la dispersión del almidón utilizando agua caliente a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, con un porcentaje de agua entre el 25% y 27% en peso del almidón, al cual luego se le incorporó el cemento asfáltico (ver Figura 6.4). El almidón gelatinizado produjo que el asfalto se espumara.

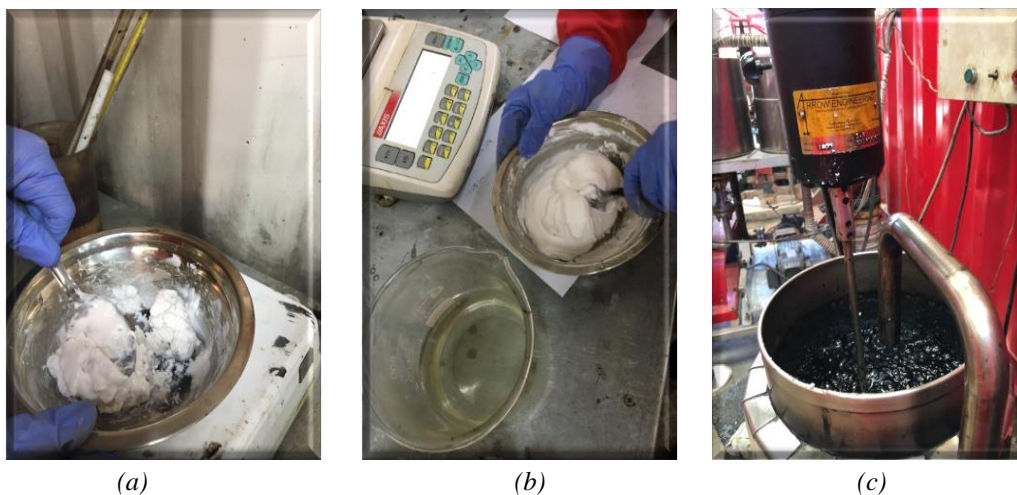


Figura 6.4 (a) Dispersión del alimón en agua caliente, (b) Almidón Gelatinizado y (c) Almidón gelatinizado incorporado en el cemento asfáltico

- Añadiendo el Almidón en seco. Se adicionó el almidón en estado seco una vez el cemento asfáltico logra la temperatura de mezcla seleccionada (ver Figura 6.5).



(a)

(b)

Figura 6.5 (a) Almidón en seco y (b) Almidón incorporado en el cemento asfáltico

Las mezclas del cemento asfáltico con los distintos porcentajes de almidón se realizaron en la planta piloto de marca SOLPER modelo CVERP-50 (ver Figura 6.6) equipada con un mezclador de paletas Arrow 2000, del Laboratorio de la empresa HQ. Desarrollando el siguiente procedimiento:

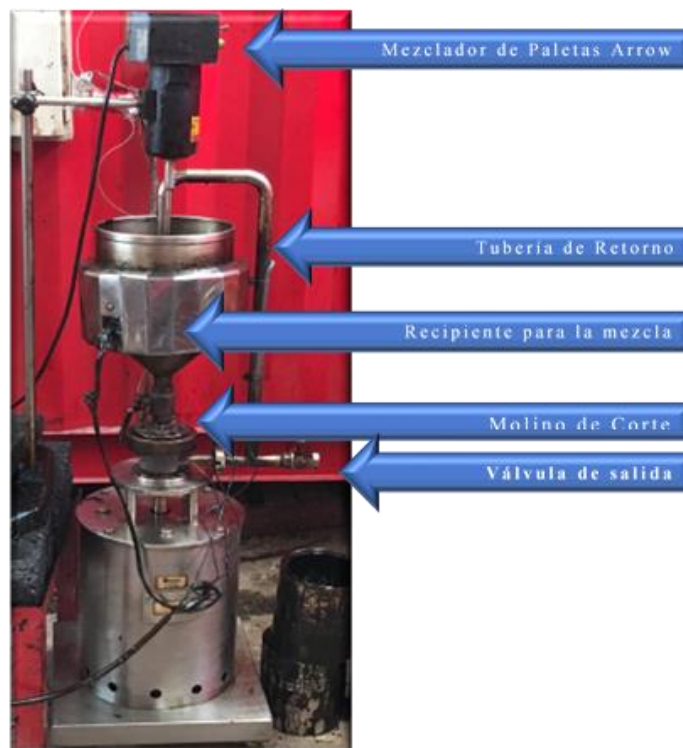


Figura 6.6 Planta piloto SOLPER modelo CVERP-50 con molino de corte coloidal

- Del total de las muestras de cemento asfáltico caracterizado separado en recipientes de almacenamiento de aproximadamente un galón, se escogió uno y se llevó al horno para calentarlo a una temperatura ligeramente menor a la temperatura de mezcla seleccionada.
- Una vez el cemento asfáltico se encontró caliente y lo suficientemente fluido para ser vaciado en corto tiempo, se pesó en una balanza digital con el recipiente y se registró el resultado, se vertió el cemento asfáltico en el recipiente para la mezcla de la planta piloto y se incrementó la temperatura hasta alcanzar la temperatura de mezcla seleccionada.
- Paralelamente, se pesó el recipiente vacío y se obtuvo el peso del cemento asfáltico, obtenido este dato se procedió a pesar en una balanza digital la cantidad de almidón requerido de acuerdo al porcentaje seleccionado para realizar la mezcla.

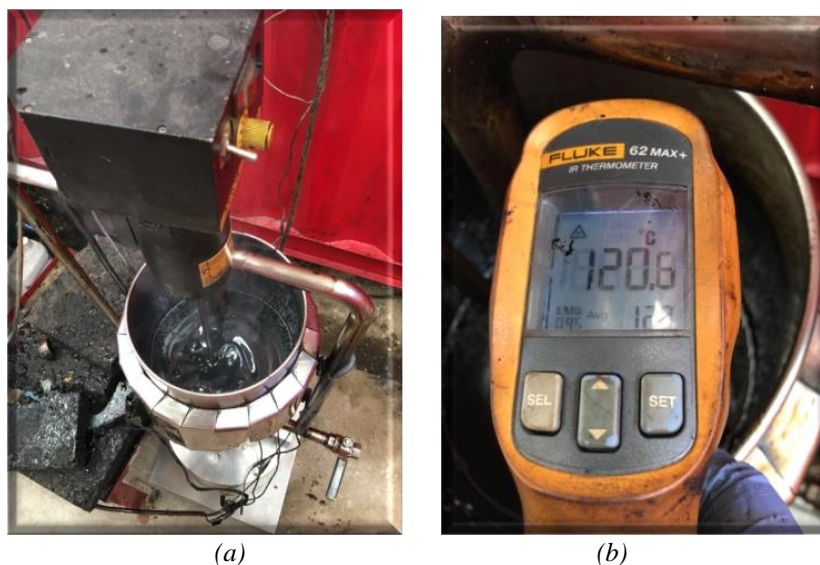


Figura 6.7 (a) Proceso de mezclado del cemento asfáltico y (b) Control de temperatura del asfalto antes de la adición del almidón

- Para realizar la mezcla del almidón con el cemento asfáltico, se verificó que este último tuviera la temperatura seleccionada y se adicionó toda la cantidad de almidón seco a temperatura ambiente utilizando un dosificador manual de aproximadamente 10 gramos (ver Figura 6.7 y Figura 6.8), dosificando lentamente y de a pocos con el fin de que la temperatura de mezcla permaneciera constante, este procedimiento se demoró alrededor de 5 minutos
- Durante el proceso de adición del almidón con el fin de obtener una mezcla homogénea, se utilizó la ayuda de un mezclador de paletas Arrow 2000 que tiene acondicionado la planta piloto, la cual trabaja a una velocidad de 500 rpm durante el tiempo de adición.

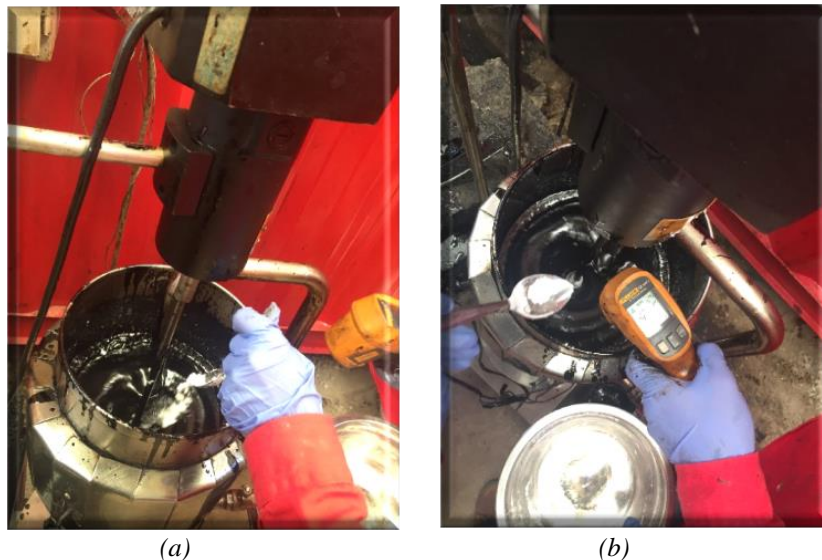


Figura 6.8 (a) Proceso de adición y mezclado del almidón y (b) Control de temperatura durante el proceso de adición del almidón

- La mezcla se dejó pasar por el molino de corte a una velocidad de 3500 rpm por 30 minutos, durante este tiempo se utilizó también el mezclador con el fin de homogenizar la mezcla y se controló la temperatura (ver Figura 6.9).

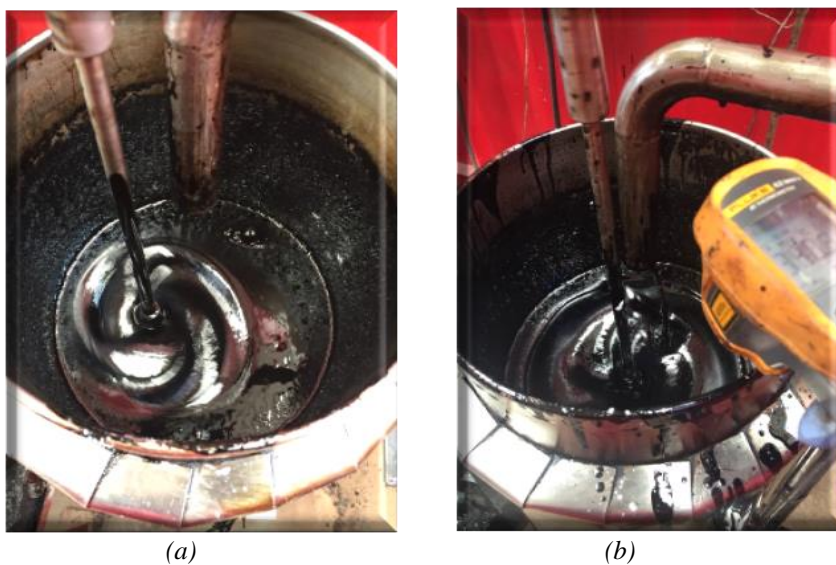


Figura 6.9 (a) Paso de la mezcla por el molino de corte y (b) Control de temperatura durante el proceso

- Cumplido el tiempo establecido, se puso un recipiente cercano a la válvula de salida para recibir toda la mezcla, debe tenerse cuidado y usar la protección adecuada para no sufrir quemaduras en el cuerpo del operador.

- Posteriormente se tomaron 2 cuartos de galón separadamente, uno para realizar todos los ensayos establecidos en el presente trabajo y otro que se dejó como contramuestra (ver Figura 6.10).



Figura 6.10 (a) Retiro de las muestras y (b) Identificación del muestreo

En la Tabla 6.3 se indican las temperaturas a las que se realizaron las muestras y los porcentajes de almidón utilizados. Adicionalmente se indican la cantidad de muestras tomadas de las mezclas tanto para los ensayos de caracterización física como para evaluar el comportamiento reológico de las mismas

Tabla 6.3
Cantidades de muestras elaboradas para ensayos

Temperatura mezclado	de	120 °C			140 °C			Total
		5%	7%	9%	5%	7%	9%	
Porcentajes de almidón		5%	7%	9%	5%	7%	9%	
Total de Mezclas		1	1	1	1	1	1	6
Muestras para Ensayos								
Mezcla sin Envejecer								
Penetración		1	1	1	1	1	1	6
Punto Ablandamiento	de	1	1	1	1	1	1	6

Viscosidad 60 °C	1	1	1	1	1	1	6
PG	3	3	3	3	3	3	18
Portaobjetos	1	1	1	1	1	1	6
<hr/>							
Mezcla Envejecida							
<hr/>							
RTFOT	1	1	1	1	1	1	6
Penetración	1	1	1	1	1	1	6
Punto de Ablandamiento	1	1	1	1	1	1	6
Viscosidad 60 °C	1	1	1	1	1	1	6
PG	3	3	3	3	3	3	18
MSCR	3	3	3	3	3	3	18

Con el propósito de evaluar el grado de homogeneidad y distribución del almidón dentro del cemento asfáltico y determinar cualitativamente la eficiencia de los porcentajes utilizados en la modificación, posterior al paso de la mezcla por el molino de corte coloidal (como parámetro adicional), se tomaron imágenes en el microscopio electrónico de luz fluorescente Marca Zeiss AxioCam MRc (ver Figura 6.11).



Figura 6.11 Microscopio Marca Zeiss AxioCAM MRc de luz fluorescente.

Para realizar los ensayos de PG y MSCR se prepararon 3 pastillas de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor de cada una de las mezclas elaboradas tanto de cemento asfáltico base como

de cemento asfáltico modificado con almidón de yuca, sin envejecer y envejecido en RTFOT
(ver Figura 6.12)



Figura 6.12 Muestras de 25 mm de diámetro y 1 mm de altura de Cemento Asfáltico modificado con Almidón de yuca para los ensayos de PG y MSCR

6.4. Caracterización Física y Reológica de los asfaltos modificados

6.4.1. Caracterización Física.

A los asfaltos modificados al igual que al cemento asfáltico base tal como se indicó en el numeral 6.1 se les realizaron los ensayos básicos para la evaluación de las propiedades físicas que se encuentran establecidos en el artículo 410-13 de las Especificaciones Generales de Construcción INVIAS 2013. tal como se muestra en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Artículo 410 - Especificaciones generales de construcción INVIAS 2013

Artículo 410 - INVIAS 2013	Asfalto Modificado	Norma de Ensayo	GRADO DE PENETRACIÓN 60 - 70	
			MIN	MAX
	Penetración (25°C, 100g, 5s), 0.1mm	E-706	60	70
	Punto de ablandamiento, °C	E-712	48	54
	Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6
	Viscosidad absoluta (60°C), P	E-717	1,500	
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720				

Artículo 410 - INVIAS 2013**GRADO DE
PENETRACIÓN
60 - 70**

Asfalto Modificado	Norma de Ensayo	MIN	MAX
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0.8
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	50	-
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-717	-	4

6.4.2. Caracterización reológica mediante el ensayo Performance Grade PG**AASHTO M320.**

Con el fin de determinar si el cemento asfáltico mejoró su comportamiento a altas temperaturas al ser modificado con almidón se realizó el ensayo de PG para las muestras sin envejecer y envejecidas en RTFOT obteniendo los valores correspondientes de módulo complejo G^* y ángulo de fase δ que permiten establecer si el almidón cumple tal fin.

Los ensayos fueron realizados en el Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-3 (ver Figura 6.13) del laboratorio de la empresa Humberto Quintero y en el Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-1 del laboratorio de materiales de la Universidad del Cauca (ver Figura 6.14).



Figura 6.13 Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-3

6.4.3. Evaluación por desempeño mediante el ensayo Multiple Stress Creep Recovery MSCR AASHTO M332.

Sobre las mismas muestras del ensayo de PG una vez finalizado, se continuó con el ensayo de MSCR únicamente para las muestras envejecidas en RTFOT de cemento asfáltico modificado con almidón de yuca, la selección del ensayo se realizó con base a la recomendación del Comité Técnico Asesor del Instituto del Asfalto que expone “...el ensayo MSCR se realiza con el fin de tener un mejor conocimiento del comportamiento del cemento asfáltico a altas temperaturas, el ensayo de MSCR representa un avance técnico al ensayo de performance grade PG” (Asfalto, 2010; AASHTO, 2015).

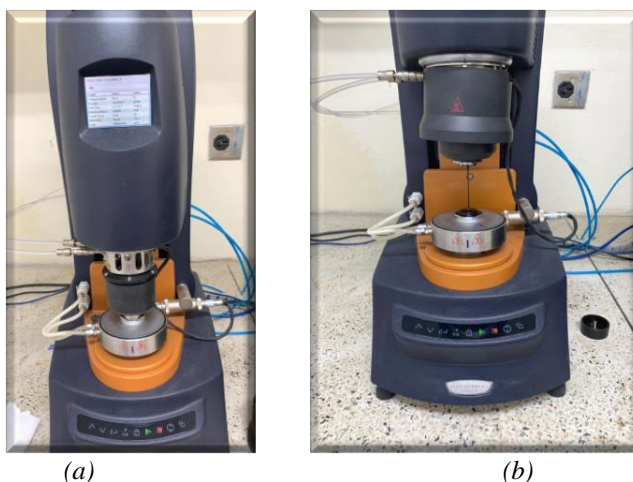


Figura 6.14 (a) Reómetro de Corte Dinámico DSR Marca TA Instruments Modelo Discovery HR-1 durante el ensayo y (b) Muestra del cemento asfáltico modificado con almidón al terminar el ensayo.

7. Análisis de los Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para:

1. Determinar los parámetros de tiempo y velocidad de mezclado del almidón de yuca incorporado en el cemento asfáltico mediante la elaboración de las diferentes mezclas de prueba.
2. La comparación y análisis de los resultados obtenidos a través de:

- a- La caracterización física del cemento asfáltico base y el asfalto modificado con almidón de yuca, establecidos en el Artículo 410 de las especificaciones generales de construcción INVIAS 2013.
- b- La caracterización reológica mediante el ensayo Performance Grade PG AASHTO M320.
- c- La evaluación por desempeño mediante el ensayo Multiple Stress Creep Recovery MSCR AASHTO M332.

Adicionalmente se realizó una evaluación cualitativa de la distribución del modificador dentro del cemento asfáltico mediante la observación de algunas muestras en el microscopio electrónico de luz fluorescente.

7.1. Selección de los parámetros de modificación y los Porcentajes de Almidón de Yuca Incorporado en el Cemento Asfáltico

Basados en la experiencia que tienen los profesionales encargados de la modificación de ligantes asfálticos en la planta de Asfalto de la empresa Humberto Quintero y atendiendo sus recomendaciones para que el proceso de mezclado a gran escala sea eficiente y se pueda replicar en planta se escogieron como parámetros de tiempo y velocidad en la planta piloto un tiempo de incorporación del modificador de 5 minutos \pm 30 segundos a una velocidad de 500 rpm y un tiempo de paso por el molino de corte de 30 minutos \pm 1 minuto a una velocidad de 3.500 rpm, para homogeneizar la mezcla.

En la selección de los especímenes de prueba inicialmente elaboradas a temperaturas de mezclado de 100°C y 150°C con porcentajes de almidón de 2%, 3%, 4% y 5%, no se obtuvieron buenos resultados.

Cuando se realizó el procedimiento de mezclado a 100°C, la adición del almidón en seco produjo una gran caída de temperatura en la mezcla y dificultades para distribuir el almidón. Para tratar de recuperar los parámetros de temperatura y velocidad elegidos se hicieron necesarios mayores tiempos de mezclado tanto en el tanque mezclador al incorporar el modificador como en el molino de corte, y aumento en las velocidades de mezclado, haciendo inviable el proceso establecido.

Al realizar el procedimiento de mezclado a 150 °C con los porcentajes de almidón escogidos, los resultados de caracterización física presentaron valores muy similares entre sí para los diferentes porcentajes utilizados; se podría pensar que se presentó una pérdida del almidón por calcinación debido a la temperatura de mezclado utilizada, las investigaciones realizadas en Colombia muestran que el almidón se degrada a temperaturas superiores a los 290 °C (Ruiz Avilés, 2015), por lo que se concluye que los porcentajes de almidón no son suficientes para modificar significativamente el asfalto base ya que propiedades físicas tales como la viscosidad no presentan mayores variaciones.

Los resultados de las muestras mezcladas a 150°C se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1

Caracterización Física del Asfalto Modificado con Almidón. Temperatura de Mezclado 150°C

Artículo 410 - INVIAS 2013	NORMA DE ENSAYO	GRADO DE PENETRACIÓN 60 - 70			
		2%	3%	4%	5%
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	E-706	60.5	59.4	60	58.2
Punto de ablandamiento °C	E-712	46.8	46.8	46.7	46.7
Viscosidad absoluta(60°C), P	E-717	1,985	2,057	1,980	2,098
Asfalto residual luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria norma de ensayo INV E-720					
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	0.534	0.529	0.502	0.493
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	E-706	32.3	32.1	33.3	32.6
Punto de ablandamiento, °C	E-712	55	55.1	54.8	54.8
Viscosidad absoluta(60°C), P	E-717	7,209	7,403	7,397	8,040

Artículo 410 - INVIAS 2013	NORMA DE ENSAYO	GRADO DE PENETRACIÓN 60 - 70			
		2%	3%	4%	5%
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	57.67	57.32	59.35	58
Incremento en el punto de ablandamiento °C	E-712	8.2	8.3	8.1	8.1
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades(60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-717	3.63	3.59	3.73	3.83

Teniendo como base los resultados anteriores y tomando como guía el artículo consultado de Ai et al. 2010 en el que los porcentajes de almidón para realizar las mezclas para modificar el cemento asfáltico con almidón varían entre 5% y 7.5% a temperaturas entre 135 °C y 142°C, se definieron tres porcentajes de almidón respecto al peso del cemento asfáltico de 5%, 7% y 9% para la elaboración de las mezclas a temperaturas de 120°C y 140°C.

Las mezclas realizadas se indican en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2

Mezclas Realizadas con Variaciones en el Porcentaje de Almidón y Temperatura de Mezclado

Mezcla No.	Porcentaje de asfalto y temperatura de mezclado
Mezcla 1:	Asfalto base + 7% almidón gelatinizado mezclado a 140 °C
Mezcla 2:	Asfalto base + 7% almidón mezclado a 140 °C
Mezcla 3:	Asfalto base + 7% almidón mezclado a 120 °C
Mezcla 4:	Asfalto base + 5% almidón mezclado a 140 °C
Mezcla 5:	Asfalto base + 5% almidón mezclado a 120 °C
Mezcla 6:	Asfalto base + 9% almidón mezclado a 140 °C
Mezcla 7:	Asfalto base + 9% almidón mezclado a 120 °C

En cuanto a las dos formas probadas de incorporar el Almidón, gelatinizado y en seco según lo descrito en el capítulo 2 Metodología y Materiales Utilizados se escogió la adición del almidón en seco ya que al añadir el Almidón Gelatinizado al cemento asfáltico, mezcla 1 (asfalto modificado con 7% de almidón gelatinizado a 140 °C), la mezcla se espumó y al intentar pasarla por el molino de corte se formaron grumos o bolas de almidón recubiertas de cemento asfáltico (ver Figura 7-1), lo que no permite una mezcla uniforme ni el paso por el molino de corte.



Figura 7-1 Grumos de Almidón Gelatinizado Formados Durante el Proceso de Mezclado

7.2. Grado de Homogeneidad y distribución del almidón de yuca en el cemento asfáltico

La observación a través del microscopio de las muestras de cemento asfáltico modificado con almidón se realizó con el fin de revisar la distribución del modificador dentro del cemento asfáltico posterior al paso de la mezcla por el molino de corte coloidal.

Las imágenes obtenidas mostraron las partículas de almidón bien distribuidas en el cemento asfáltico, a las cuales se les realizaron mediciones encontrando que:

Para la mezcla 4 (asfalto modificado con 5% de almidón a 140°C, Figura 7-2) se observaron partículas de almidón de tamaño entre 2 y 6 μm en forma alargada.

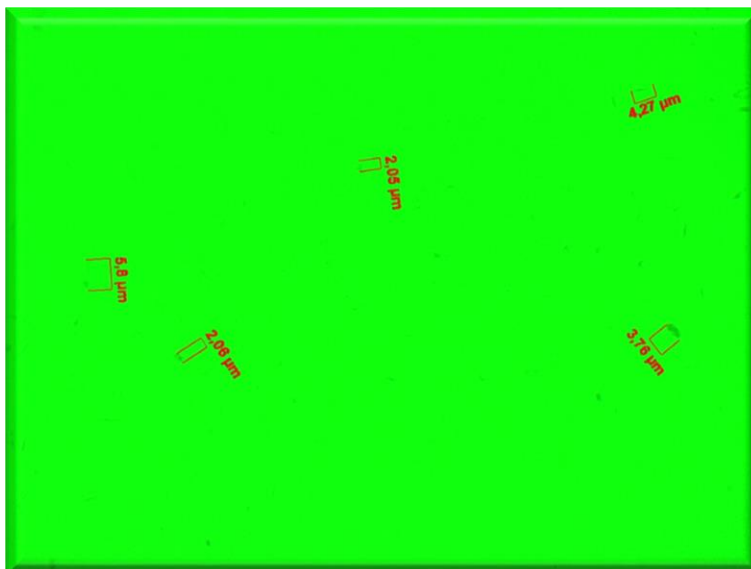


Figura 7-2 Dispersión del almidón en el cemento asfáltico. Mezcla 4: asfalto + 5% de almidón a 140 °C

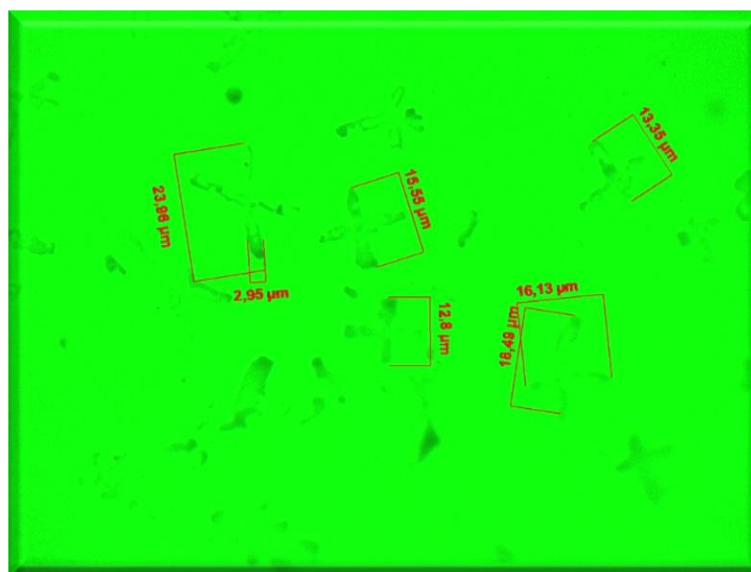


Figura 7-3 Dispersión del almidón en el cemento asfáltico en forma de cruz. Mezcla 3: asfalto + 7% de almidón a 120 °C

Para la mezcla 3 (asfalto modificado con 7% de almidón a 120 °C, Figura 7-3) se observaron partículas de almidón de tamaño entre 13 y 24 μm en forma de cruz con un espesor de 2.95 μm .

Para la mezcla 2 (asfalto modificado con 7% de almidón a 140 °C, Figura 7-4) se observaron partículas de almidón de tamaño entre 3.6 y 4.7 μm en forma alargada.

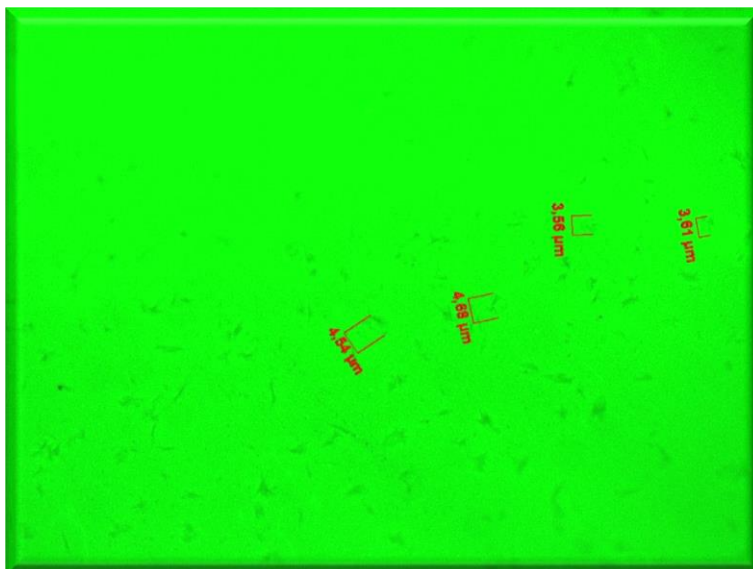


Figura 7-4 *Dispersión del almidón en el cemento asfáltico. Mezcla 2: asfalto + 7% de almidón a 140 °C.*

El procedimiento para encontrar y medir las partículas de almidón no es fácil, debe ser realizado por una persona experimentada en el manejo del microscopio y contar con suficiente tiempo para realizar la observación ya que al poner las muestras en el objetivo del microscopio es muy probable que no se observe el almidón directamente en la pantalla, siendo necesario realizar una búsqueda en toda la muestra.

De acuerdo con las figuras anteriores se puede concluir que las mezclas elaboradas a 140°C presentan una mejor dispersión del almidón en el cemento asfáltico con una mayor reducción del almidón comparado con la mezcla elaborada a 120°C donde se observa en forma de cruz de mayor tamaño (ver Tabla 7-3).

Tabla 7-3

Forma y Tamaño del Almidón del Asfalto Modificado Observado en el Microscopio

Mezcla	Forma del Almidón	Tamaño del Almidón µm
Asfalto con 5% de almidón a 140 °C	Alargada	2 - 6
Asfalto con 7% de almidón a 120 °C	Cruz	13 - 24
Asfalto con 7% de almidón a 140 °C	Alargada	3.6 – 4.7

7.3. Resultados de la Caracterización Física y Reológica de los asfaltos modificados

7.3.1. Caracterización Física

Los resultados de los ensayos para la caracterización física del asfalto base y los asfaltos modificados según lo establecido en el artículo 410-13 de las Especificaciones Generales de Construcción INVIAS 2013, tanto para las muestras sin envejecer como para las muestras envejecidas en el RFTOT, se muestran en la Tabla 7-4 para las mezclas a 120 y 140°C. El análisis de los resultados se realizó tomando como base el Artículo 410-13, en razón a que aún no se encuentra disponible una especificación para el uso de modificadores de asfalto con biopolímeros como es el caso del almidón de yuca.

Tabla 7-4

Caracterización Física de Asfalto Modificado con Almidón, a Temperatura de Mezclado 120 y 140°C

Artículo 410-13	Norma de Ensayo	Grado de Penetración 60 - 70		Asfalto Base	Porcentaje de Almidón y Temperatura de Mezclado					
		Min.	Máx.		5%		7%		9%	
					120°C	140°C	120°C	140°C	120°C	140°C
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	E-706	60	70	67,6	60,6	63,2	60,4	59,3	60,7	56,6
Punto de ablandamiento, °C	E-712	48	54	48,3	48,0	48,0	48,3	47,5	49,6	48,2
Índice de penetración	E-724	-1,2	+0.6	-0,92	-1,27	-1,17	-1,20	-1,46	-0,84	-1,38
Viscosidad (60°C), P	E-717	1.500		1.980	2.290	2.290	2.640	2.920	2.560	2.900
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720										
Pérdida de masa por calentamiento,%	E-720	-	0,8	0,14	0,491	0,364	0,501	0,336	0,647	0,435
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	E-706	-	-	41	35,0	40,8	35,1	35,1	29,7	31,0
Punto de ablandamiento, °C	E-712	-	-	54,2	55,0	54,0	57	56,8	56,7	56,3
Viscosidad (60°C), P	E-717	-	-	6.820	7.950	6.710	9.400	10.400	13.200	11.700
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	50	-	60,7	57,8	64,5	58,1	59,2	48,9	54,8
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	9	5,9	7,0	6,0	8,7	9,3	7,1	8,1
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades(60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-717	-	4	3,4	3,5	2,9	3,6	3,6	5,2	4,0

Con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros físicos de los Asfaltos Modificados en relación a los diferentes porcentajes y temperaturas de mezclado se presentan las gráficas de las propiedades físicas.

A temperaturas medias de servicio, la consistencia del asfalto modificado evaluada a través de la Penetración (ver Figura 7-5), presentó en relación con el asfalto original una menor penetración lo que indica mayor consistencia en el asfalto modificado y una marcada diferencia entre el asfalto modificado original y envejecido en RTFOT desde 22.4 hasta 31 mm, sin embargo, no se observaron variaciones significativas al cambiar la temperatura de mezclado.

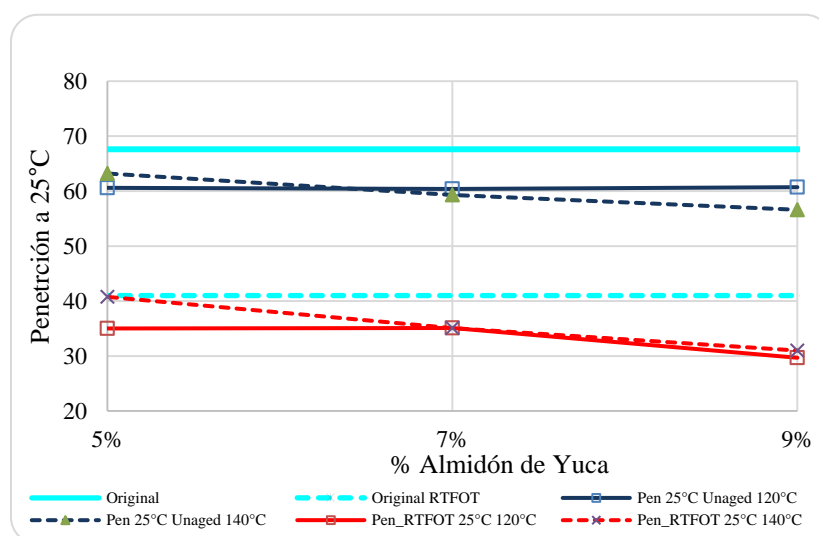


Figura 7-5 Comparación de Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperatura de Mezclados de 120 y 140 °C

A temperaturas altas de servicio, en relación con el asfalto original los asfaltos modificados sin envejecer no presentaron variaciones significativas en el punto de ablandamiento, sin embargo, al comparar el asfalto original con el asfalto modificado envejecido se apreció una disminución para los porcentajes más altos de modificante. Entre el asfalto modificado original y el envejecido en RTFOT se apreciaron diferencias en el Punto de ablandamiento (°C) entre 6°C y 9°C (ver Figura 7-6). En relación a la temperatura de mezclado no se presentaron diferencias importantes.

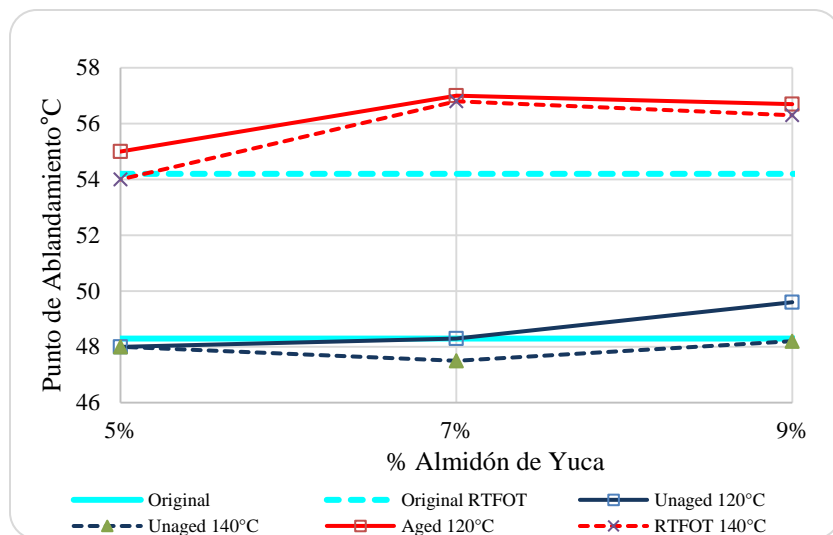


Figura 7-6 Comparación del Punto de Ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperaturas de Mezclado 120 y 140°C

A temperaturas altas de servicio, la relación de viscosidad a 60°C entre los asfaltos envejecidos en RTFOT y los modificados originales presentaron variaciones de 3.5 a 5.2 para 120°C y de 2.9 a 4.0 para 140°C (ver Figura 7-7), no observando influencia de las temperaturas de mezclado. Al comparar los asfaltos modificados con el asfalto original a medida que se aumentó el porcentaje de modificante se incrementó la viscosidad, en los asfaltos envejecidos la variación fue mayor que en los no envejecidos.

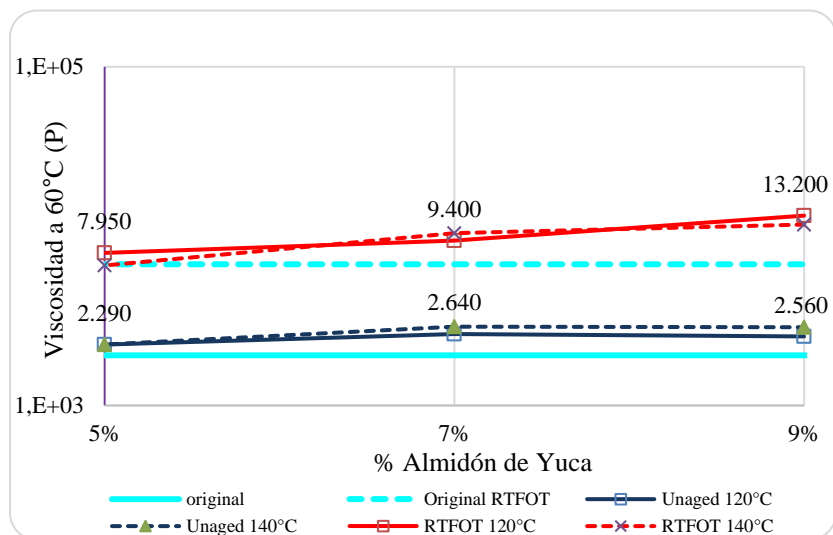


Figura 7-7 Comparación de la Viscosidad a 60°C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón para las Temperaturas de Mezclado 120 y 140 °C

En el análisis de los resultados obtenidos de las muestras de asfalto modificado con almidón mezclado a temperaturas de 120 °C y 140°C, se observó que:

Influencia de la adición del almidón en la consistencia a temperaturas medias y altas de servicio

- A las temperaturas medias de servicio, la consistencia del cemento asfáltico base evaluada a través de la Penetración del asfalto modificado a 120 °C, se encontró dentro del rango de la especificación, presentando una leve disminución en el asfalto modificado a diferentes porcentajes de almidón similares entre sí y de un 10% en relación con el asfalto base original. En cuanto al asfalto modificado a 140 °C, se observó que hay una disminución en la penetración a medida que se incrementa la cantidad de almidón, para el 7% y 9%, los valores se encontraron por fuera del límite mínimo de la especificación.
- A temperaturas altas de servicio, en los asfaltos modificados a 120 y 140 °C, no se presentó influencia de la adición del almidón en el Punto de ablandamiento (°C) del asfalto base, excepto para el del 9% a 120°C, en el cual se apreció un incremento muy bajo del 2.7%. Se puede considerar que no hay una influencia sensible en este parámetro físico.
- A temperaturas altas de servicio, la viscosidad a 60°C en el asfalto modificado a 120°C con el 5%, 7%, y 9% de almidón presentó incrementos de 15.7%, 33.3% y 29.3% respectivamente, con relación al asfalto base. Igualmente, en el asfalto modificado a 140°C, se incrementó la viscosidad con porcentajes de 115.7%, 147.5% y 146.5% para los porcentajes de 5%, 7% y 9% de almidón respectivamente. Esto permite concluir que el incremento en la viscosidad se podrá reflejar en un incremento de la resistencia a las deformaciones plásticas con la adición de este biopolímero.

Influencia de la adición del almidón en la susceptibilidad térmica

Se observó un incremento en la susceptibilidad térmica medida a través del Índice de penetración, en relación con el asfalto base, En el asfalto modificado a 120°C para el 5% y 7% de almidón se observó una disminución del IP entre el 37,2% y 29.4% respectivamente, mientras que para el 9% de almidón se observó un incremento del 8.8%, esta situación sugiere que el almidón produce un cambio químico en el asfalto base, incidiendo en la susceptibilidad térmica del asfalto modificado. Con el menor porcentaje de modificante el índice de penetración disminuyó incrementando la susceptibilidad térmica del asfalto modificado, y a medida que se aumentó el porcentaje de modificante el índice de penetración fue aumentando hasta el punto que con 9% de almidón el índice de penetración aumentó respecto al asfalto base, lo que indica que el asfalto modificado con este porcentaje puede ser menos susceptible térmicamente que el asfalto base.

En relación con el asfalto modificado a 140°C se observó un incremento en la susceptibilidad térmica en relación con el asfalto base. Para el 7% y 9% de almidón se observó una disminución del índice de penetración de 57.4% y 48.9% respectivamente que sale del rango de la especificación, mientras para el 5% aunque disminuye el IP el valor se encontró dentro del rango de la especificación. Esta situación es similar a la presentada para las temperaturas de mezcla de 120°C, y sugiere que el almidón produce un cambio químico en el asfalto base, incidiendo en la susceptibilidad térmica del asfalto modificado. Con el menor porcentaje de modificante aparentemente no presentó cambio en susceptibilidad térmica, sin embargo, para los porcentajes mayores de modificante el índice de penetración disminuyó incrementando la susceptibilidad térmica del asfalto modificado.

Influencia de la adición del almidón en el grado de envejecimiento durante el proceso de mezclado en la planta asfáltica

En relación con los resultados del asfalto envejecido en RTFOT se tiene que:

- Pérdida de masa por calentamiento (%), para el asfalto modificado a 120°C el resultado de la pérdida se incrementó a medida que aumentó la cantidad de almidón con valores mayores al 250%, aunque el valor cumple con los valores de la especificación. Para el asfalto modificado a 140 °C, la pérdida fue mayor para el 9% de modificante y la variación fue de 259%, 239%, 310% para los porcentajes de almidón de 5%, 7% y 9% respectivamente, los resultados obtenidos cumplen con los rangos de la especificación, la pérdida de masa en RTFOT fue alta.

Penetración del residuo en % de la penetración del asfalto original, para el asfalto modificado a 120 °C, se observó que el valor disminuyó cuando se incrementó el almidón, sin embargo, para el 9% de almidón, no cumple con el límite inferior de la especificación, (ver

- *Figura 7-8).*

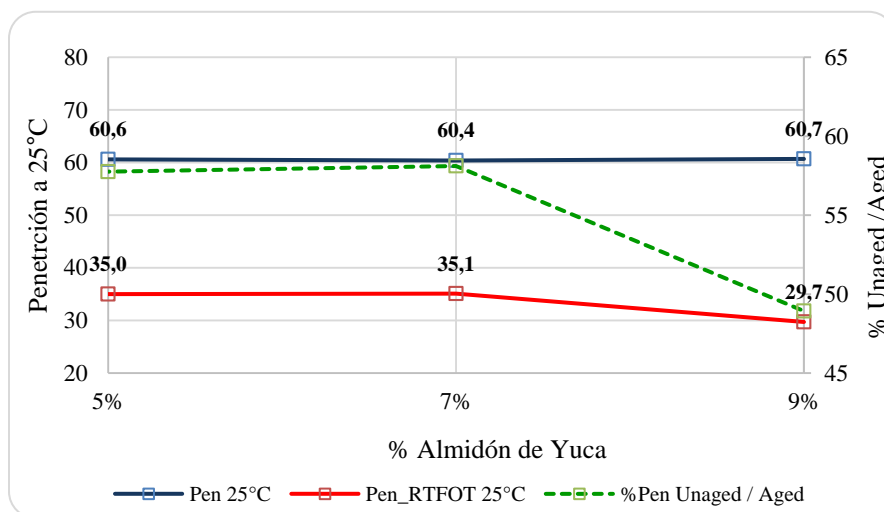


Figura 7-8 Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C

Para el asfalto modificado a 140 °C, se observó que el resultado es inverso al incremento del porcentaje de modificante, para el 7% y 9% de almidón, el resultado no cumple el límite inferior, (ver Figura 7-9).

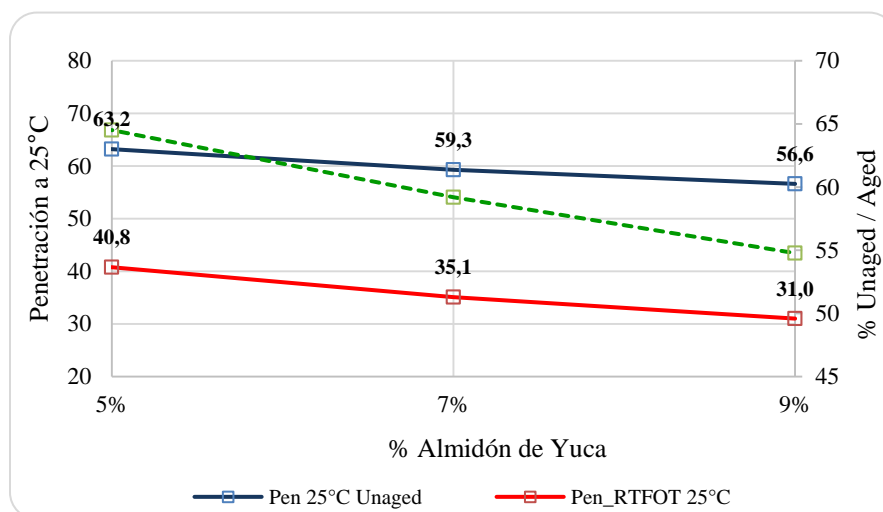


Figura 7-9 Penetración a 25 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C

- Incremento en el punto de ablandamiento (°C), para el asfalto modificado a 120°C, en relación al asfalto base se observó que se incrementó el punto de ablandamiento, siendo menores al límite máximo, (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 7-10 Punto de Ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C

En relación al asfalto modificado a 140°C, no se observó una tendencia en los resultados, para el 7% de almidón sobrepasa el límite máximo de la especificación, (ver Figura 7-11).

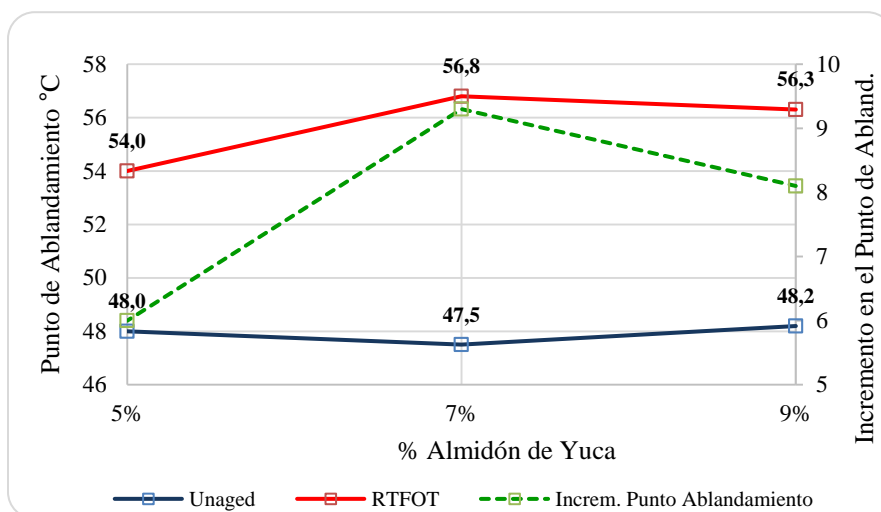


Figura 7-11 Punto de ablandamiento Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfalto Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C

- Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto envejecido y el asfalto original, los resultados obtenidos para las muestras de asfalto modificado a 120 °C son similares al asfalto original, sin embargo, para el 9% de almidón, el incremento sobrepasa el valor de referencia de la especificación, (ver Figura 7-12).

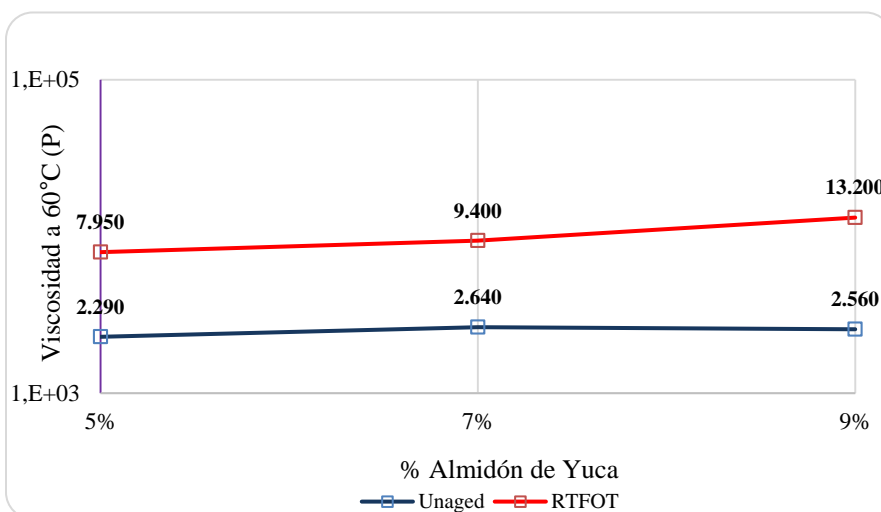


Figura 7-12 Viscosidad a 60°C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 120 °C

Para las muestras de asfalto modificado a 140 °C los resultados presentaron un incremento a medida que aumentó la cantidad de almidón, los resultados se encuentran por debajo del límite máximo de la especificación, (ver Figura 7-13).

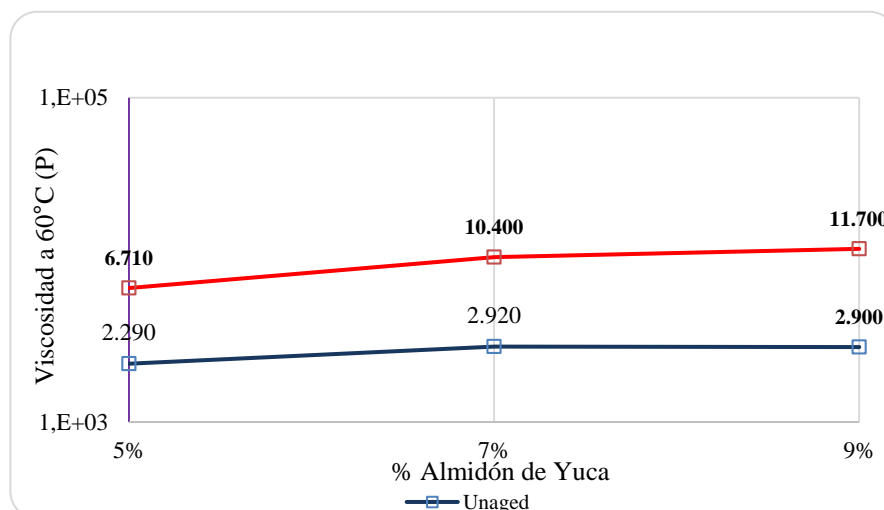


Figura 7-13 Viscosidad a 60 °C Sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT Asfáltico Modificado con Almidón – Temperatura de Mezclado 140 °C

7.3.2. Caracterización Reológica

7.3.2.1. Grado de desempeño PG (Performance Grade) AASHTO M320.

Los resultados del módulo complejo G^* y ángulo de fase δ , obtenidos del ensayo PG determinados con el Reómetro de Corte Dinámico DSR para las muestras de asfalto base y modificado sin envejecer se relacionan en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5

Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado sin Envejecer

Asfalto + % almidón	Temp. de mezclado °C.	PG	Osc. Stress Pa	δ degrees	G^* kPa	$G^*/\sin \delta$ kPa
Original		58	0,28	85,6	2,33	2,34
5	120	70	0,12	86,6	1,01	1,02
5	140	70	0,13	86,5	1,07	1,07
7	120	64	0,15	86,9	1,21	1,21
7	140	64	0,27	85,5	2,24	2,25
9	120	70	0,14	87	1,15	1,15
9	140	70	0,14	87	1,13	1,13

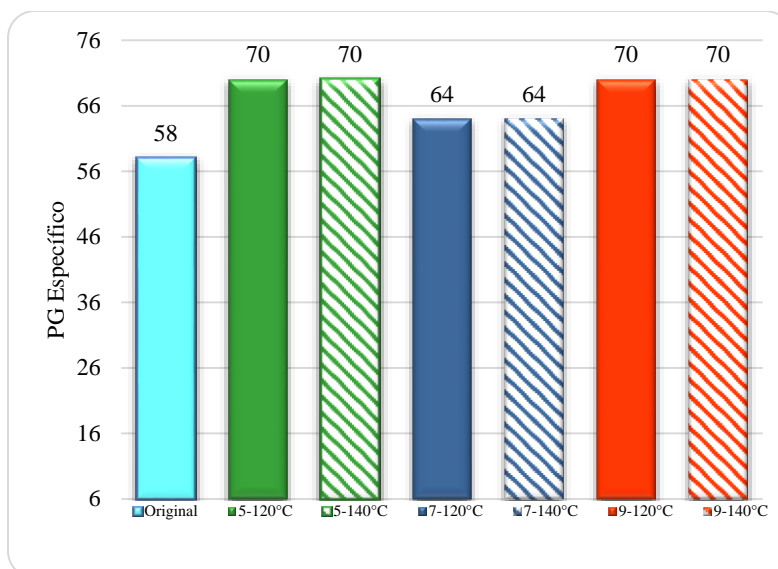


Figura 7-14 PG para los Asfaltos Modificados sin Envejecer

De acuerdo con los resultados de los ensayos, el PG del asfalto modificado (ver Figura 7-14) mejoró el comportamiento en dos grados cuando se dosificó al 5% y 9% de almidón y mejoró un grado el comportamiento cuando se adicionó el 7%. En la tabla 7.5 en relación con los resultados del asfalto modificado con el 7% a 120°C, se puede evidenciar que el valor obtenido en cuanto al módulo complejo es menor comparado con los resultados de la muestra de 7% a 140 °C, observando igual comportamiento en todas las pruebas reológicas realizadas. Este comportamiento puede relacionarse con lo observado en el microscopio respecto a la forma en cruz de las partículas para la muestra de asfalto modificado con el 7% de almidón a 120°C.

Con el fin de realizar una comparación del módulo complejo G^* , ángulo de fase δ y el factor de deformación $G^*/\text{sen } \delta$, se fijó como temperatura de referencia 58 °C (Temperatura para la cual el asfalto base cumple con el requerimiento mínimo exigido por la especificación AASHTO M320 Para $G^*/\text{sen } \delta \geq 1.0$ kPa). Los resultados para los diferentes porcentajes de modificante utilizados se presentan en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6

Comparación de los Resultados de G^* , δ y $G^*/\text{sen } \delta$ del Asfalto Modificado a 58 °C con Diferentes Porcentajes de Almidón, sin Envejecer

Asfalto + % almidón	Temp. de mezclado °C.	Temp.	δ degrees	G^* kPa	$G^*/\text{sen } \delta$ kPa	% $G^*_{\text{Modif.}} / G^*_{\text{Original}}$	$\delta_{\text{Modif.}} - \delta_{\text{Original}}$
Original	-	58	85,6	2,33	2,34	-	-
5	120	58	83,3	5,97	6,02	257%	-2,3
5	140	58	83	6,48	6,52	279%	-2,6
7	120	58	85,4	2,98	2,99	128%	-0,2
7	140	58	83,2	6,41	6,46	276%	-2,4
9	120	58	83,5	6,35	6,39	273%	-2,1
9	140	58	83,5	6,27	6,31	270%	-2,1

Se observó que independientemente del porcentaje de almidón, existe un incremento del módulo complejo G^* , y una disminución del ángulo de fase δ , lo que indica que el asfalto modificado presentó una mayor componente elástica de la deformación que se traduce en un mejor comportamiento bajo la acción del tránsito pesado a bajas velocidades aportando una mayor resistencia a las deformaciones plásticas como ligante asfáltico en una mezcla asfáltica.

En las figuras Figura 7-15 y Figura 7-16 se puede ver la relación entre el factor de ahuellamiento o rutting $G^*/\text{sen } \delta$ y el ángulo de fase δ con la temperatura

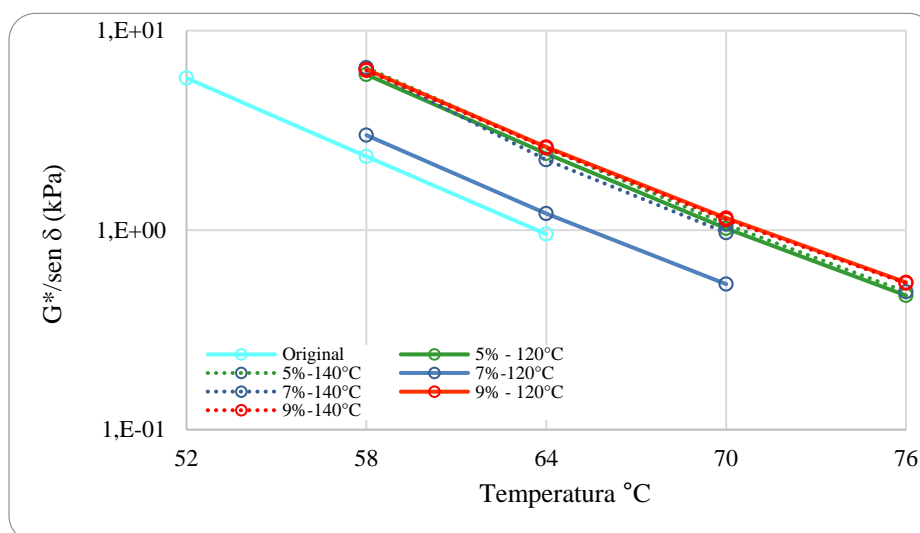


Figura 7-15 Factor de Ahuellamiento – Asfalto original y Asfaltos Modificados sin Envejecer

En el factor de ahuellamiento aumentó respecto del asfalto original independiente del porcentaje de almidón y de la temperatura de mezclado.

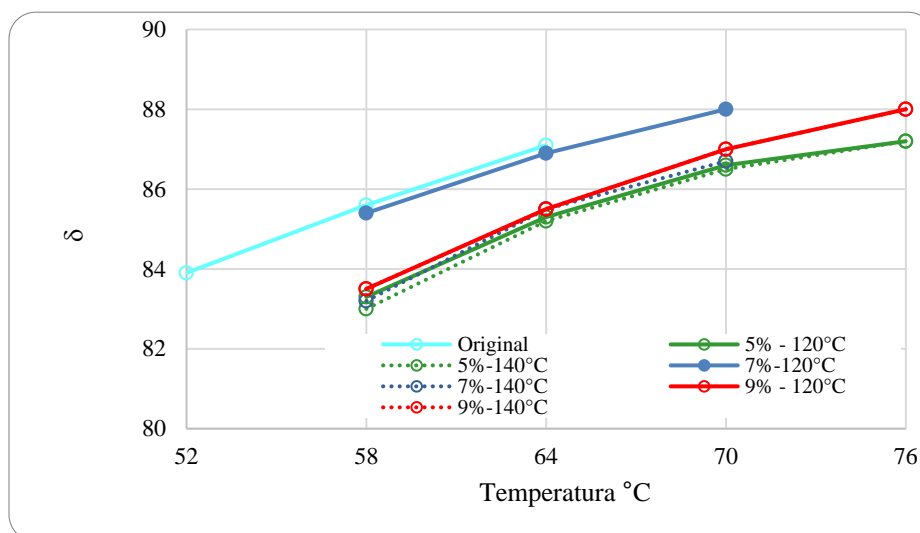


Figura 7-16 Ángulo de Fase δ - Asfalto original y Asfaltos Modificados sin Envejecer

Por su parte el ángulo de fase disminuyó con relación al asfalto original independiente del porcentaje de almidón y de la temperatura de mezclado. La Tabla 7-7 presenta un resumen de los resultados del ensayo Performance Grade AASHTO M 320 realizado a los especímenes envejecidos a través del ensayo RTFOT.

Tabla 7-7

Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT

Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	PG	Osc. Stress Pa	δ degrees	G* kPa	G*/sin δ kPa
Original	-	64	0,25	83,9	2,59	2,61
5	120	70	0.12	86,6	1.01	1,02
5	140	64	0,43	81,8	4,3	4,34
7	120	64	0,35	82,1	3,51	3,55
7	140	70	0,23	82,7	2,32	2,34
9	120	70	0,36	80,7	3,63	3,67
9	140	70	0,35	81,4	3,53	3,57

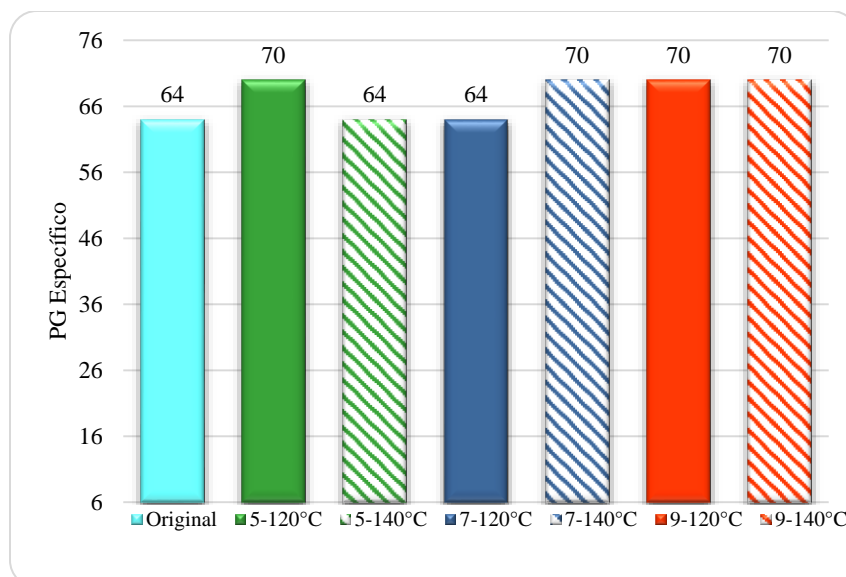


Figura 7-17 PG de los Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT

Los resultados obtenidos de PG para las muestras de asfaltos modificados envejecidas en RTFOT (ver Figura 7-17), presentaron un grado de mejoramiento respecto al asfalto original envejecido, excepto las muestras de 5% mezclada a 140 °C y 7% mezclada a 120°C.

En relación con la resistencia a la deformación plástica se observó que para los asfaltos modificados se presentó mayor módulo complejo y menor ángulo de fase que para el asfalto original, lo que indica que el asfalto modificado mejora la resistencia a la deformación plástica.

En la Tabla 7-8, se resumen los valores de módulo complejo G^* y ángulo de fase δ , para 64 °C como temperatura de referencia (Temperatura para la cual el asfalto base cumple con el requerimiento mínimo exigido por la especificación AASHTO M320 Para $G^*/\sin \delta \geq 2.2$ kPa).

Tabla 7-8
 Comparación de los Resultados de G^* , δ y $G^*/\sin \delta$ del Asfalto Modificado a 64°C con
 Diferentes Porcentajes de Almidón, Envejecido en RTFOT

Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	Temp.	δ degrees	G^* kPa	$G^*/\sin \delta$ kPa	% $G^*_{\text{Modif.}} /$ G^*_{Original}	$\delta_{\text{Modif.}} -$ δ_{Original}
Original	-	64	83,9	2,59	2,61	-	-
5	120	64	85,3	2,41	2,42	93%	1,4
5	140	64	81,8	4,3	4,34	166%	-2,1
7	120	64	82,1	3,51	3,55	136%	-1,8
7	140	64	80	5,45	5,53	210%	-3,9
9	120	64	77,9	8,11	8,29	313%	-6,0
9	140	64	78,5	8,08	8,25	312%	-5,4

Se observó el incremento de módulo complejo desde el 93% hasta 313% a medida que aumentó el porcentaje de modificante; en relación con el ángulo de fase se observó una reducción del ángulo desde 1.8 hasta 6.0 a medida que aumentó el porcentaje de modificante, excepto para la muestra de 5% a 120 °C que incrementó el ángulo de fase. Estas dos condiciones permiten determinar que el almidón de yuca como modificante mejoró el comportamiento reológico del cemento asfáltico, ya que mejoró el comportamiento elástico y mejoró la resistencia a las deformaciones plásticas, al igual que con lo determinado con la caracterización física a través de la evaluación a temperaturas medias y altas de servicio mediante los ensayos de Penetración y viscosidad.

Se puede determinar con los resultados hasta aquí obtenidos que no hay influencia de la temperatura de mezclado para un mismo porcentaje de almidón, lo que puede observarse en la Figura 7-15, Figura 7-16, Figura 7-18 y Figura 7-19.

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las muestras envejecidas en RTFOT, del factor de rutting o ahuellamiento $G^*/\sin \delta$ vrs temperatura (ver Figura 7-18), y del ángulo de fase δ vrs temperatura, (ver Figura 7-19).

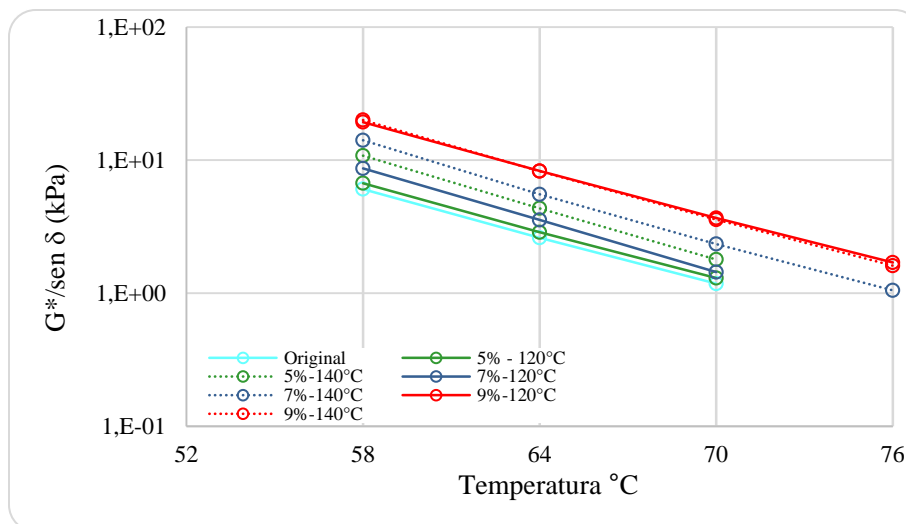


Figura 7-18 Factor de Ahuellamiento – Asfalto original y Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT

En cuanto al factor de ahuellamiento, se observó un comportamiento similar para todas las muestras y al aumentar la temperatura el factor aumentó a medida que aumentó el porcentaje de modificante.

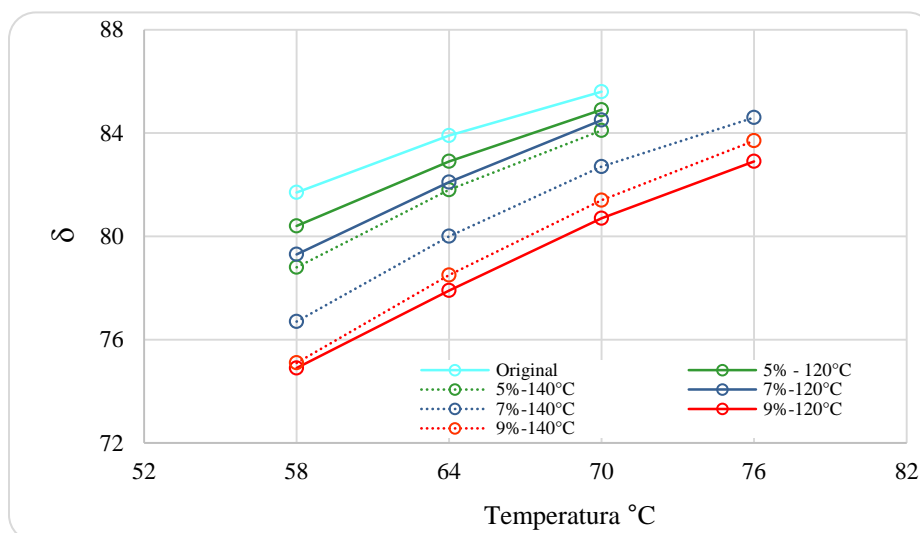


Figura 7-19 Ángulo de Fase δ - Asfalto original y Asfaltos Modificados Envejecidos en RTFOT

Se observó que para la misma temperatura el ángulo de fase disminuyó a medida que aumentó el porcentaje de modificante.

En la Tabla 7-9 y Figura 7-20 se relacionan el PG del asfalto modificado sin envejecer y envejecido en RTFOT, se observó que el asfalto modificado envejecido incrementó un grado de

comportamiento en relación con el asfalto original envejecido; disminuyó el ángulo de fase y aumentó el módulo complejo, lo que indica un mejor comportamiento en la deformación plástica.

Tabla 7-9

Resultados Ensayo PG, Asfalto Modificado sin Envejecer y Envejecido en RTFOT

Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	PG	PG RTFOT	δ degrees	δ degrees RTFOT	G* kPa	G* kPa RTFOT
Original		58	64	85,6	83,9	2,33	2,59
5	120	70	70	86,6	85,3	1,01	2,41
5	140	70	64	86,5	81,8	1,07	4,3
7	120	64	64	86,9	82,1	1,21	3,51
7	140	64	70	85,5	80	2,24	5,45
9	120	70	70	87	77,9	1,15	8,11
9	140	70	70	87	78,5	1,13	8,08

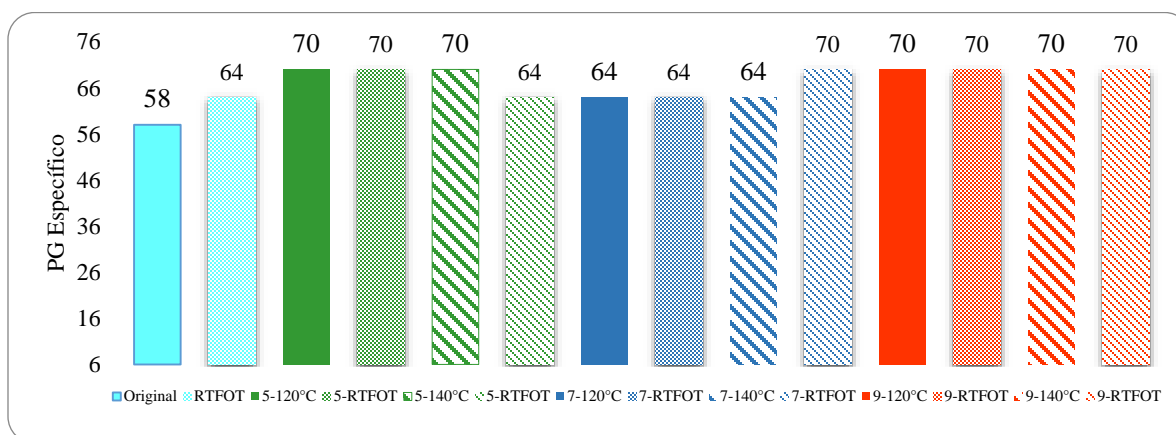


Figura 7-20 PG en el punto de falla para los Asfaltos Modificados sin Envejecer y Envejecidos en RTFOT

En la tabla 7-9 y figura 7-20 se evidencia que aunque el resultado de PG es igual para el mismo porcentaje de almidón adicionado a diferentes temperaturas, la diferencia en el comportamiento del asfalto se debe observar en los resultados del ángulo de fase δ y el módulo complejo G*

7.3.3. Evaluación del grado de desempeño de los residuos asfálticos según el ensayo

Multiple Stress Creep Recovery MSCR AASHTO M332

En la Tabla 7-10 . se presentan los resultados del ensayo de MSCR realizado para las muestras envejecidas en RTFOT de cemento asfáltico modificado con almidón de yuca, el cual se realizó para determinar la resistencia del asfalto modificado a la deformación mediante los parámetros de compliance creep recovery o deformación total no recuperable J_{nr} y la recuperación elástica.

Se relacionan los resultados del ensayo donde se observó que las muestras más resistentes a la deformación ($< J_{nr}$), para los dos niveles de esfuerzo 0.1 kPa y 3.2 kPa son las muestras de asfalto modificado con 7% de almidón para 120°C y 140°C.

Tabla 7-10
Resultados Ensayo MSCR, Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT

Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	R0.1 %	R3.2 %	Rdiff %	Jnr0.1 kpa ⁻¹	Jnr3.2 kpa ⁻¹	Jnrdiff %	Polímero cumple como elastómero
Original		8,59	2,9	66,22	2,67	3,9	46,07	-
5	120	6,01	1,09	81,84	3,04	3,49	14,62	No
5	140	7,41	2,09	71,76	1,96	2,23	13,79	No
7	120	10,16	2,88	71,64	1,63	1,94	18,63	No
7	140	10,87	3,52	67,64	1,38	1,60	15,55	No
9	120	16,22	2,28	85,94	1,96	2,57	31,24	No
9	140	7,81	1,82	76,75	2,36	2,72	15,6	No

En la Tabla 7-11. se relaciona el Performance Grade encontrado de acuerdo con AASHTO M 332. Siguiendo la Tabla 1 de la norma AASHTO M 332, con los parámetros de $J_{nr3.2}$ kPa⁻¹ y $J_{nr\text{diff}}$, se determinaron el performance grade para el asfalto original y asfaltos modificados envejecidos en RTFOT y la capacidad para soportar determinada cantidad de tránsito en ejes equivalentes de 80 kN, (ver Figura 7-21).

Tabla 7-11

Determinación del PG de Asfalto Original y Asfalto Modificado Envejecido en RTFOT

Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	Jnr3.2 kpa⁻¹	Jnrdiff %	PG AASHTO 320	PG AASHTO M 332
Original		3,90	46,07	PG 58	PG 64S
5	120	3,49	14,62	PG 70	PG 70S
5	140	2,23	13,79	PG 70	PG 64S
7	120	1,94	18,63	PG 64	PG 64H
7	140	1,60	15,55	PG 64	PG 70H
9	120	2,57	31,24	PG 70	PG 70S
9	140	2,72	15,6	PG 70	PG 70S

Nivel de Tráfico ESAL, S:<10 millones, H: 10 – 30 millones de ESAL

En relación con la recuperación elástica de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 7-10, las muestras de asfalto modificado con 7% de almidón presentaron los mejores porcentajes de recuperación para el mayor nivel de esfuerzo.

De forma general con los bajos resultados de recuperación elástica R3.2 el almidón de yuca no se clasifica como polímero tipo elastómero, sin embargo, los resultados de PG obtenidos refieren el almidón como polímero tipo plastómero.

Con el fin de determinar las propiedades de desempeño de los Asfaltos Modificados, en la Figura 7-24 tomada de la especificación AASHTO M 332 se graficaron los resultados obtenidos del ensayo MSCR para las temperaturas de mezclado de 120 y 140 °C. Se observó que el mejor comportamiento lo presentaron la muestra de 7% a 140°C seguida de la muestra de 7% a 120 °C a pesar de los bajos resultados en el ensayo de PG ya que los asfaltos modificados con este porcentaje podrán ser utilizados para tráficos hasta de 30 millones de ejes o velocidades entre 20 y 70 km/h. El asfalto original y los asfaltos modificados con porcentajes diferentes al

presentar mayores deformaciones soportaran hasta 10 millones de ejes y velocidades mayores a 70 km/h.

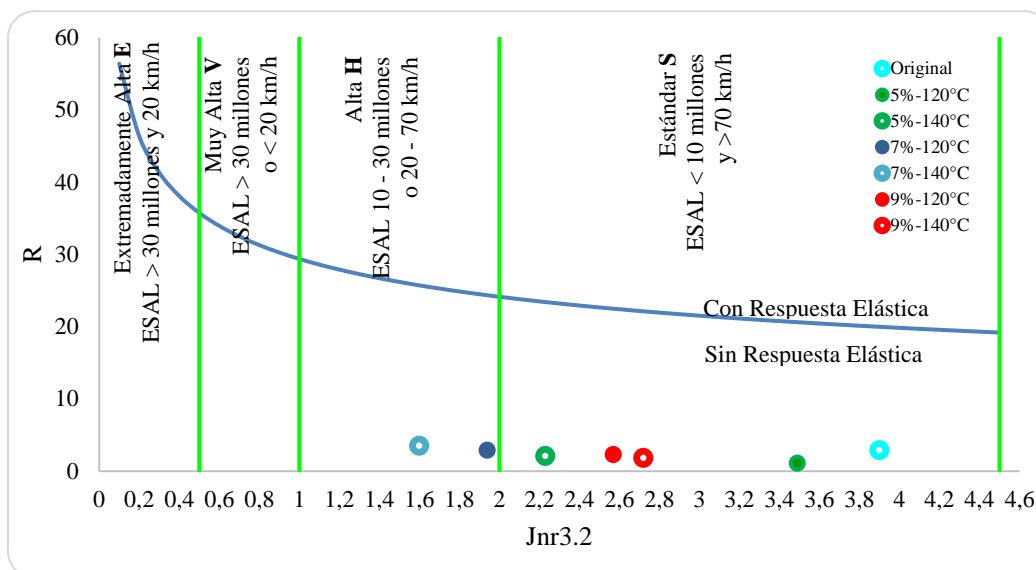


Figura 7-21 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Resultados Ensayo MSCR (Escala Logarítmica)

En las curvas de deformación de los 20 ciclos presentadas a continuación, se observó que el asfalto modificado con el 7% de almidón mezclado a 120 °C (ver Figura 7-22) y el asfalto modificado con el 7% de almidón mezclado a 140 °C (ver Figura 7-23), presentaron menor deformación permanente.

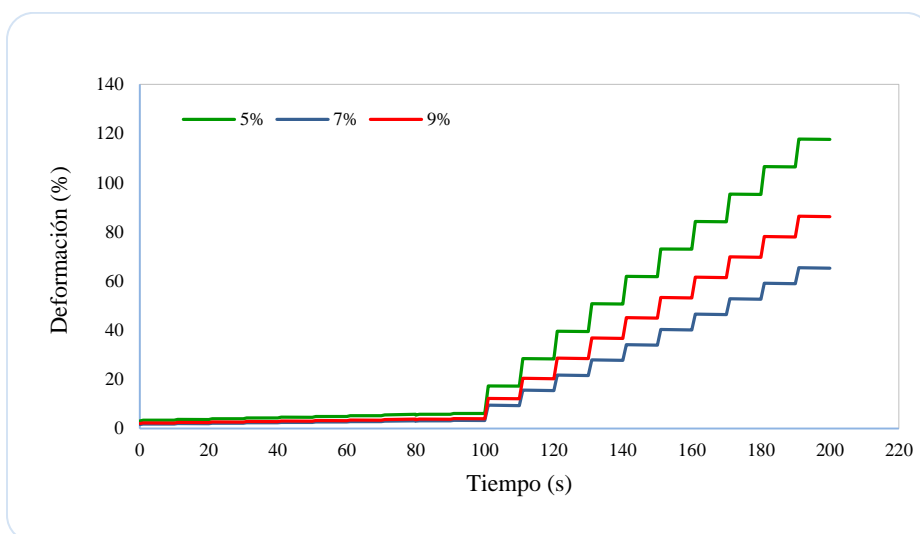


Figura 7-22 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Mezclados a 120°C. Resultados Ensayo MSCR

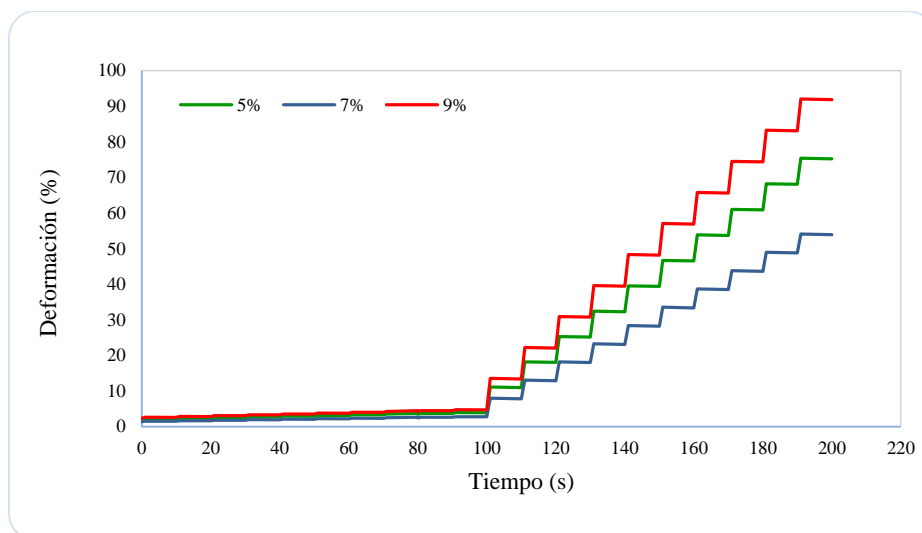


Figura 7-23 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Mezclados a 140°C. Resultados Ensayo MSCR

Con el fin de observar el comportamiento cuando se aplicó bajo esfuerzo se presenta la gráfica de deformación en escala logarítmica, ver Figura 7-24, donde se evidenció que la menor deformación ocurre en el asfalto modificado con 7% de almidón de yuca.

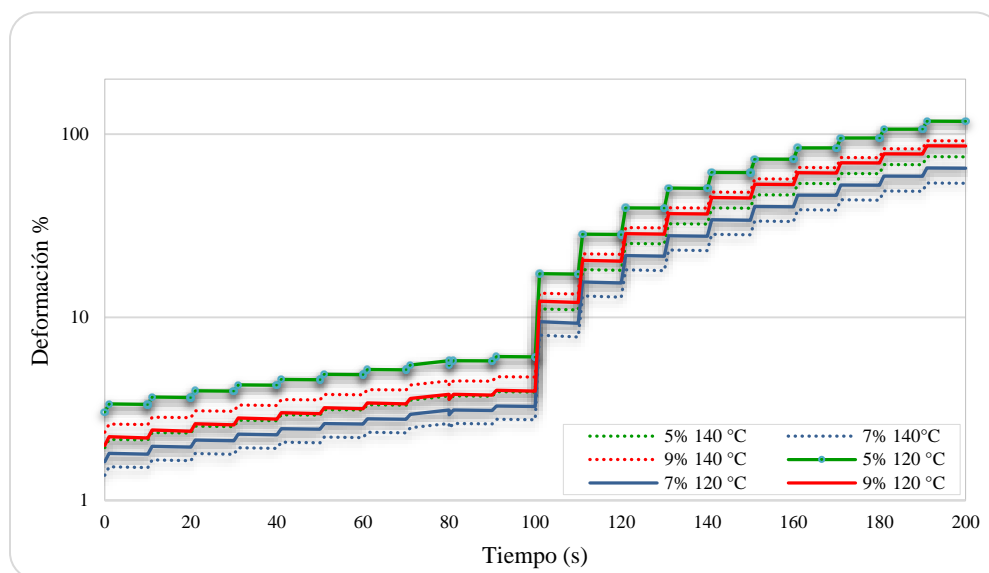


Figura 7-24 Curvas de Deformación de los Asfaltos Modificados Resultados Ensayo MSCR (Escala Logarítmica)

A continuación, se realiza un análisis de acuerdo con los resultados de los ensayos de las propiedades físicas y las propiedades reológicas como el performance grade y MSCR de los

asfaltos modificados en relación con la resistencia a la deformación permanente que se encuentran en la Tabla 7-12.

Para la temperatura de mezclado de 120 °C, en cuanto a las propiedades físicas se seleccionó el asfalto modificado con 9% como el de mejor comportamiento por tener menor penetración y mayor viscosidad original y envejecida. Así mismo en cuanto al PG original y envejecido presentó el mayor valor de módulo complejo y el menor ángulo de fase que indica tener una mayor componente elástica. Al analizar los resultados de MSCR, la menor deformación no recuperable y el mayor porcentaje de recuperación elástica la presentó el asfalto modificado con 7%, lo que indica finalmente que es el de mejor resistencia a la deformación permanente.

Respecto a la temperatura de mezclado de 140 °C, en cuanto a las propiedades físicas se seleccionó el asfalto modificado con 9% como el de mejor comportamiento por tener menor penetración y mayor viscosidad original y envejecida. En cuanto al PG original se seleccionó el del 7%, para el PG del asfalto envejecido, se seleccionó el del 9% que presentó el mayor valor de módulo complejo y el menor ángulo de fase que indica tener una mayor componente elástica. Al analizar los resultados de MSCR, la menor deformación no recuperable y el mayor porcentaje de recuperación elástica lo presentó el asfalto modificado con 7%, lo que indica finalmente que es el de mejor resistencia a la deformación permanente.

Tabla 7-12

Resumen de los Resultados de los Ensayos Asfalto Original y Asfalto Modificado

Artículo 410 -13	ASF. BASE		120 °C		140 °C		
	0%	5%	7%	9%	5%	7%	9%
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	67,6	60,6	60,4	60,7	63,2	59,3	56,6
Punto de ablandamiento,°C	48,3	48,0	48,3	49,6	48,0	47,5	48,2
Índice de penetración	-0,92	-1,27	-1,20	-0,84	-1,17	-1,46	-1,38
Viscosidad (60°C), P	1.980	2.290	2.640	2.560	2.290	2.920	2.900
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720							
Pérdida de masa por calentamiento,%	0,14	0,491	0,501	0,647	0,364	0,336	0,435
Penetración (25°C,100g,5s), 0,1mm	41	35,0	35,1	29,7	40,8	35,1	31,0
Punto de ablandamiento,°C	54,2	55,0	57	56,7	54,0	56,8	56,3
Viscosidad absoluta(60°C), P	6.820	7.950	9.400	13.200	6.710	10.400	11.700
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	60,7	57,8	58,1	48,9	64,5	59,2	54,8
Incremento en el punto de ablandamiento,°C	5,9	7,0	8,7	7,1	6,0	9,3	8,1
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades(60°C) del asfalto residual y el asfalto original	3,4	3,5	3,6	5,2	2,9	3,6	4,0
PG Original							
Angular Frec.rad/s	10	10	10	10	10	10	10
PG	58	70	64	64	70	64	70
Osc. Stress Pa	0,28	0,12	0,15	0,27	0,13	0,15	0,14
% Strain	12	12	12	12,1	12	12	12
δ degrees	85,6	86,6	86,9	85,5	86,5	86,9	87
G* kPa	2,33	1,01	1,21	2,24	1,07	1,21	1,13
G*/sin δ kPa	2,34	1,02	1,21	2,25	1,07	1,21	1,13
PG RFTOT							
Angular Frec.rad/s	10	10	10	10	10	10	10
PG	64	64	64	70	64	70	70
Osc. Stress Pa	0,25	0,28	0,35	0,36	0,43	0,23	0,35
% Strain	10	10	10	10	10	10	10
δ degrees	83,9	82,9	82,1	80,7	81,8	82,7	81,4
G* kPa	2,59	2,85	3,51	3,63	4,3	2,32	3,53
G*/sin δ kPa	2,61	2,87	3,55	3,67	4,34	2,34	3,57
MSCR							
R0.1 %	8,59	6,01	10,16	16,22	7,41	10,87	7,81
R3.2 %	2,9	1,09	2,88	2,28	2,09	3,52	1,82
Rdiff %	66,22	81,84	71,64	85,94	71,76	67,64	76,75
Jnr0.1 kpa-1	1,43	3,04	1,63	1,96	1,96	1,38	2,36
Jnr3.2 kpa-1	3,9	3,49	1,94	2,57	2,23	1,6	2,72
Jnrdiff %	10,87	14,62	18,63	31,24	13,79	15,55	15,6
Polímero cumple como elastómero	-	No	No	No	No	No	No

8. Conclusiones y Recomendaciones

Las pruebas realizadas basadas en la experiencia en el manejo en planta, permitieron definir los parámetros de tiempo y velocidad de mezclado, el tiempo de incorporación del modificante se estableció en 5 minutos a una velocidad de 500 rpm y el tiempo de paso por el molino de corte en 30 minutos a una velocidad de 3,500 rpm. Dichos parámetros son adecuados para trabajar con eficiencia en planta de modificación. Mediante la observación en el microscopio electrónico de luz fluorescente se verificó que las partículas de almidón se encuentran bien distribuidas en el cemento asfáltico utilizando los parámetros definidos.

Las pruebas se realizaron a diferentes temperaturas de mezclado desde 100°C hasta 150°C, con los resultados obtenidos se puede concluir que las temperaturas adecuadas para la mezcla son entre 120°C y 140°C ya que, al incorporar el almidón a baja temperatura 100°C se producen caídas de temperatura que hacen inmanejable las mezclas y se incrementan los costos de manejo en planta por que se deben aumentar los tiempos y velocidades tanto de mezclado como de paso por el molino de corte, y al incorporar el almidón a alta temperatura 150°C se acelera el envejecimiento del asfalto modificado y se incrementan los costos de manejo en planta al tener que mantener el asfalto a dicha temperatura.

Los resultados de las propiedades físicas obtenidos en las mezclas realizadas con bajos porcentajes de almidón 2%, 3%, 4% y 5% indican que no son suficientes para modificar significativamente el asfalto. Con base en dichos resultados y tomando como referencia los porcentajes de modificante utilizados por algunos investigadores se definieron tres porcentajes de almidón de 5%, 7% y 9% para la elaboración de las mezclas.

Se ensayaron dos métodos de incorporar el almidón en el asfalto, gelatinizado y en seco, determinando que la mejor manera de adicionar el almidón es en seco ya que al incorporar el almidón gelatinizado, la cantidad de agua que este contiene produce que el asfalto se espume y se formen grumos que no permitieron el paso hacia el molino de corte.

Los resultados obtenidos para los ensayos del asfalto modificado sin envejecer a 120°C y 140°C evaluados entre sí y del asfalto modificado envejecido en RTFOT a 120°C y 140°C evaluados entre sí, no presentan variaciones significativas lo que indica que los resultados de los ensayos para asfaltos modificados con almidón de yuca son independientes de la temperatura de mezclado.

Para los resultados de los ensayos básicos de las propiedades físicas, a mayor cantidad de almidón la penetración disminuye y se incrementa la viscosidad, lo que indica que el asfalto modificado tiene mayor consistencia y dureza que el asfalto original y podrá tener mayor resistencia a la deformación plástica.

El almidón de yuca como modificador sirve para normalizar el asfalto y puede evaluarse su función como complemento a otros modificadores.

En el ensayo Performance Grade a alta temperatura, los resultados muestran que para los asfaltos modificados en relación con el asfalto base se incrementa el módulo complejo y se reduce el ángulo de fase, lo que indica que el asfalto modificado con almidón presenta un comportamiento más elástico y se incrementa el PG entre 1 y 2 grados de comportamiento.

El asfalto modificado con el 9% de almidón tiene un mejor comportamiento en PG, pero al realizar los ensayos de MSCR el asfalto modificado con el 7% de almidón presenta mejor resistencia a la deformación permanente, aunque tiene menor PG que el de 9%.

De acuerdo con los resultados de deformación plástica del ensayo MSCR, el almidón como modificador no se clasifica como elastómero, sin embargo, se puede considerar como plastómero al igual que materiales como el PET, PVC o Evaloy.

De acuerdo con la norma AASHTO M 332 el asfalto modificado con el 7% de almidón se clasifica como de tipo H, es decir, que puede ser empleado en pavimentos que tengan demanda en ejes equivalentes entre 10 y 30 millones o velocidades entre 20 y 70 km/h.

Al realizar las mezclas para porcentajes bajos de almidón, de acuerdo con los resultados, al parecer se presenta mayor susceptibilidad térmica debido a cambios en los componentes químicos del ligante asfáltico, en especial a los grupos moleculares más polares. Queda abierto el tema para investigar sobre la influencia en la composición química del ligante asfáltico al ser modificado con almidón de yuca.

Se recomienda en una segunda etapa de investigación, realizar mezclas asfálticas con asfalto modificado con almidón en los mismos porcentajes para evaluar la resistencia a las deformaciones plásticas y dada la condición de rigidez de los asfaltos modificados evaluar la resistencia a la fatiga.

9. Bibliografía

- Ai, A. H., & Tan, Y. Q. (2009). Performance evaluation of prepared gelled hot sealant in cold climates. En A. Loizos, M. Partl, T. Scarpas, & I. Al-Qadi, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol I* (Vol. I, págs. 227 - 237). Grecia: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ai, A.-H., Tan, Y.-q., & Ayman, T. H. (2010). Starch as a Modifier for Asphalt Paving Materials. En *Construction and Building Materials, Volume 25* (págs. 14-20). Elsevier.
- Anderson, M. (2011). *The Asphalt Binder Handbook MS-26*. Asphalt Institute.
- Arenas Lozano, H. L. (2013). *Tecnología del Cemento Asfáltico, Quinta Edición*. Popayán: FA Editores.
- Asfalto, C. T. (2 de Diciembre de 2010). Guidance on the Use of the MSCR Test with the AASHTO M320 Specification. Lexington, Kentucky, USA. Obtenido de Asphalt Institute.
- Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. (2009). *Starch Chemistry and Technology, Third Edition*. (J. BeMiller, & R. Whistler, Edits.) Amsterdam: ELSEVIER.
- NCHRP. (2010). *National Cooperative Highway Research Program, 648 Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot Mix Asphalt*. Washington, D.C.: The National Academies.
- NCHRP. (2011). *National Cooperative Highway Research Program, report 673, A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Sterling, VA: The National Academies.
- Ruiz Avilés, G. (2015). *Trabajo de Grado, Polímeros Biodegradables a Partir del Almidón de Yuca*. Universidad EAFIT, Medellín.

- Sam, S., Nuradibah, M., Chin, K., & Hani, N. (2016). Current Application and Challenges on Packaging Industry Based on Natural Polymer Blending. En O. Olatunji, *Natural Polymer Industry Techniques and Applications* (pág. 166). witzerland: Springer.
- Sánchez Sabogal, F., & Campagnoli Martínez, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras, Guia práctica para los estudios y diseños* . Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sharma, S. K., & Mudhoo, A. (2011). *A Handbook of Applied Biopolymer Technology*. Cambridge: RSC Publishing.
- The Asphalt Handbook MS-4*. (2007). Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Visakh, P., & Long, Y. (Edits.). (2016). *Starch-based Blends, Composites and Nanocomposites*. Cambridge, UK: Royal Society Chemistry.

Anexos

ANEXO 1

**CUADRO DE RESULTADOS ENSAYOS DE PG CON DSR PARA DIFERENTES
PORCENTAJES DE ALMIDON Y TEMPERATURAS DE MEZCLADO ASFALTO SIN
ENVEJECER**

PERFORMANCE GRADE AASHTO M 320							
Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	Temp.	Osc. Stress Pa	δ degrees	G* kPa	G*/sin δ kPa	Pass/Fail
0	0	52	0,69	83,9	5,74	5,78	Pass
		58	0,28	85,6	2,33	2,34	Pass
		64	0,12	87,1	0,955	0,957	Fail
5	120	58	0,72	83,3	5,97	6,02	Pass
		64	0,29	85,3	2,41	2,42	Pass
		70	0,12	86,6	1,01	1,02	Pass
		76	0,06	87,2	0,47	0,471	Fail
5	140	58	0,78	83	6,48	6,52	Pass
		64	0,31	85,2	2,58	2,59	Pass
		70	0,13	86,5	1,07	1,07	Pass
		76	0,06	87,2	0,491	0,491	Fail
7	120	58	0,36	85,4	2,98	2,99	Pass
		64	0,15	86,9	1,21	1,21	Pass
		70	0,06	88	0,535	0,536	Fail
7	140	58	0,77	83,2	6,41	6,46	Pass
		64	0,27	85,5	2,24	2,25	Pass
		70	0,12	86,7	0,97	0,971	Fail
9	120	58	0,76	83,5	6,35	6,39	Pass
		64	0,31	85,5	2,6	2,61	Pass
		70	0,14	87	1,15	1,15	Pass
		76	0,07	88	0,547	0,547	Fail
9	140	58	0,75	83,5	6,27	6,31	Pass
		64	0,31	85,5	2,57	2,58	Pass
		70	0,14	87	1,13	1,13	Pass
		76	0,06	88	0,541	0,542	Fail

ANEXO 2

CUADRO DE RESULTADOS ENSAYOS DE PG CON DSR PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ALMIDON Y TEMPERATURAS DE MEZCLADO, ASFALTO ENVEJECIDO RTFOT

PERFORMANCE GRADE AASHTO M 320							
Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	Temp.	Osc. Stress Pa	δ degrees	G* kPa	G*/sin δ kPa	Pass/Fail
ORIGINAL	-	58	0,6	81,7	5,99	6,05	Pass
		64	0,25	83,9	2,59	2,61	Pass
		70	0,12	85,6	1,17	1,18	Fail
5	120	58	0.72	83.3	5.97	6.02	Pass
		64	0.29	85.3	2.41	2.42	Pass
		70	0.12	86.6	1.01	1.02	Pass
		76	0.06	87.2	0.47	0.471	Fail
5	140	58	1,07	78,8	10,6	10,8	Pass
		64	0,43	81,8	4,3	4,34	Pass
		70	0,18	84,1	1,78	1,79	Fail
7	120	58	0,85	79,3	8,51	8,66	Pass
		64	0,35	82,1	3,51	3,55	Pass
		70	0,14	84,5	1,43	1,44	Fail
7	140	58	1,38	76,7	13,7	14,1	Pass
		64	0,55	80	5,45	5,53	Pass
		70	0,23	82,7	2,32	2,34	Pass
		76	0,11	84,6	1,05	1,05	Fail
9	120	58	1,88	74,9	18,6	19,3	Pass
		64	0,81	77,9	8,11	8,29	Pass
		70	0,36	80,7	3,63	3,67	Pass
		76	0,17	82,9	1,69	1,7	Fail
9	140	58	1,96	75,1	19,4	20	Pass
		64	0,81	78,5	8,08	8,25	Pass
		70	0,35	81,4	3,53	3,57	Pass
		76	0,16	83,7	1,61	1,61	Fail

ANEXO 3

**CUADRO DE RESULTADOS ENSAYOS DE PG CON DSR PARA DIFERENTES
PORCENJES DE ALMIDON Y TEMPERATURAS DE MEZCLADO, ASFALTO
ENVEJECIDO RTFOT**

MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY AASHTO M 332								
Asfalto + % almidón	Temp. De mezclado °C.	R0.1 %	R3.2 %	Rdiff %	Jnr0.1 kpa⁻¹	Jnr3.2 kpa⁻¹	Jnrdiff %	Polímero cumple como elastómero
Original	-	8.59	2.9	66.22	2.67	3.9	46.07	-
5	120	6.01	1.09	81.84	3.04	3.49	14.62	No
5	140	7.41	2.09	71.76	1.96	2.23	13.79	No
7	120	10.16	2.88	71.64	1.63	1.94	18.63	No
7	140	10.87	3.52	67.64	1.38	1.60	15.55	No
9	120	16.22	2.28	85.94	1.96	2.57	31.24	No
9	140	7.81	1.82	76.75	2.36	2.72	15.6	No