

OBTENCIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR MODIFICACIÓN QUÍMICA DE
CRUDOS PESADOS COLOMBIANOS

MARÍA PAULA MARTÍNEZ PARADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

OBTENCIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR MODIFICACIÓN QUÍMICA DE
CRUDOS PESADOS COLOMBIANOS

MARÍA PAULA MARTÍNEZ PARADA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniera Química

Director

Ph.D. Jose Luis Agudelo Valderrama

Universidad Industrial de Santander

Co-Director

Ph.D. Alexei Chiman

Corasfaltos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios que día a día me bendice con su amor, me regala vida, salud y sobre todo, por regalarme la oportunidad que muchas personas no tuvieron como es estudiar.

En segundo lugar, a mis padres, por el esfuerzo que hicieron día a día para verme convertida en una Ingeniera Química. Y en general, a todos y cada uno de mis familiares que de una u otra forma estuvieron presentes brindándome todo su apoyo.

A la Universidad Industrial de Santander, y con ella, a mis amigos de allí, y a todos los profesores, por todos los conocimientos que adquirí en el transcurso de la carrera.

Por último y no menos importante, a CORASFALTOS y a todas las personas que integran la corporación, ya que gracias a todos fue posible la realización del presente trabajo de grado. En especial a mis compañeros de laboratorio, por acogirme con alegría y transmitirme todo el conocimiento necesario para llevar a cabo la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PROCEDIMIENTO.....	18
1.1 METODOLOGÍA	18
1.2 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS PESADOS COLOMBIANOS	18
1.2.1 Determinación del contenido de agua.....	19
1.2.2 Densidad Relativa.....	19
1.2.3 Composición química de crudos del petróleo	19
1.3 MODIFICACIÓN QUÍMICA DE CRUDOS PESADOS	20
1.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS LIGANTES OBTENIDOS...23	
1.4.1 Penetración.....	23
1.4.2 Ductilidad	23
1.4.3 Punto de ablandamiento	24
1.4.4 Susceptibilidad térmica	24
1.4.5 Viscosidad de asfaltos	25
1.4.6 Determinación del módulo de corte complejo	25
1.4.7 Envejecimiento de los ligantes en el horno rotatorio de lámina delgada.....	26

1.4.8 Cámara de envejecimiento a presión.....	26
1.4.9 Determinación de la rigidez a la flexión por fluencia del ligante asfáltico.....	27
1.4.10 Ensayo de adherencia del bitumen.....	27
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
2.1 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS PESADOS	29
2.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN	29
2.3 ANÁLISIS CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS MODIFICADOS	30
2.4 ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE, FISURA A LA FATIGA Y DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO	34
2.5 EFECTO DEL PROCESO DE MODIFICACIÓN EN LA ADHERENCIA LIGANTE ASFÁLTICO-AGREGADO.....	37
3. CONCLUSIONES	41
4. RECOMENDACIONES.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS	51

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología usada en el desarrollo del proyecto	18
Figura 2. Reactor batch en donde se realizó la modificación.....	21
Figura 3. Representación esquemática del montaje para el ensayo BBS.	28
Figura 4. Factor de ahuellamiento para los ligantes	35
Figura 5. Fuerza de adhesión ligante asfáltico – agregado	39
Figura 6. Ensayo contenido de agua	52
Figura 7. Picnómetro.....	53
Figura 8. Montaje del ensayo Densidad Relativa.	53
Figura 9. Montaje del ensayo de penetración	57
Figura 10. Ductilímetro.....	58
Figura 11. Anillo y bola usados en el ensayo.....	59
Figura 12. Montaje ensayo punto de ablandamiento	59
Figura 13. Viscosímetro Capilar de vacío	60
Figura 14. Reómetro de corte dinámico.....	61
Figura 15. Horno rotatorio de lámina delgada. a) Cerrado; b) Abierto.	62

Figura 16. Cámara de envejecimiento a presión.....	63
Figura 17. Muestra después del envejecimiento a presión	63
Figura 18. Reómetro de barra flexible.....	64
Figura 19. Probeta para el ensayo de flexión	64
Figura 20. Equipo PATTI (PNEUMATIC ADHESION TENSILE TESTING)	65
Figura 21. Huellas de ligante luego del ensayo con diferentes agregados.	65
Figura 22. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros	67

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de crudos pesados colombianos usados	29
Tabla 2. Composición química de las muestras.....	30
Tabla 3. Características fisicoquímicas de los ligantes asfálticos obtenidos.	31
Tabla 4. Resistencia a la tensión del asfalto convencional en agregados	37
Tabla 5. Resistencia a la tensión de los diferentes ligantes obtenidos, con mármol como agregado	38
Tabla 6. Resistencia a la tensión de los diferentes ligantes obtenidos, con granito como agregado.....	38
Tabla 7. Modificación de crudo 1	55
Tabla 8. Modificación de crudo 2	55
Tabla 9. Modificación crudo 3	56
Tabla 10. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 1	68
Tabla 11. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 2	69
Tabla 12. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 3.....	70

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Montaje del ensayo contenido de agua	52
ANEXO B. Montaje del ensayo densidad relativa.....	53
ANEXO C. Cantidad de modificaciones hechas a los crudos	55
ANEXO D. Penetrómetro	57
ANEXO E. Ductilímetro.....	58
ANEXO F. Punto de ablandamiento	59
ANEXO G. Viscosímetro.....	60
ANEXO H. Reómetro de corte dinámico.....	61
ANEXO I. Envejecimiento por horno rotatorio de lámina delgada	62
ANEXO J. Cámara de envejecimiento a presión	63
ANEXO K. Reómetro de barra flexible	64
ANEXO L. Ensayo de adherencia del bitumen	65
ANEXO M. Especificaciones para asfalto modificado con polímeros INVIAS	67
ANEXO N. Resultados ensayos de grado de desempeño (pg) de los ligantes asfálticos (crudos modificados).....	68

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR MODIFICACIÓN QUÍMICA DE CRUDOS PESADOS COLOMBIANOS*

AUTOR: MARÍA PAULA MARTÍNEZ PARADA**

PALABRAS CLAVES: CRUDOS PESADOS, LIGANTE ASFÁLTICO, MODIFICACIÓN QUÍMICA, PENETRACIÓN DE MATERIALES ASFÁLTICOS, ADHESIÓN.

DESCRIPCIÓN: La obtención de asfaltos a partir de la refinación del petróleo es un proceso complejo, que implica un alto consumo de energía y que es poco ecológico. Teniendo en cuenta que los crudos pesados colombianos representan una materia prima alternativa para obtener ligantes asfálticos, la corporación Corasfaltos ha logrado desarrollos en procesos tendientes a elevar la viscosidad de tal tipo de crudos con fin de conferirles propiedades a fin de que puedan ser útiles en la construcción de carreteras.

En el presente estudio se seleccionaron tres crudos pesados y se realizaron diferentes formulaciones en laboratorio con diversos componentes a fin de determinar la composición adecuada que permitiera darles propiedades básicas de ligantes asfálticos. Con el objetivo de validar que dicho método tiene factibilidad técnica, se escalaron las formulaciones en un reactor *batch* y se obtuvieron tres ligantes asfálticos, los cuales se caracterizaron fisicoquímicamente según las normas vigentes con ensayos que permitieron evaluar su calidad, idoneidad y desempeño. Los ensayos realizados fueron: penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, viscosidad dinámica, envejecimiento RTFOT y PAV. Además, se les practicó ensayos complementarios como determinación del módulo complejo y la determinación de la rigidez.

De acuerdo a los resultados, los ligantes obtenidos presentaron buenas características fisicoquímicas, lo cual permitiría su uso en vías secundarias y terciarias, por ejemplo en las cercanas a las zonas en donde se producen los crudos pesados. Este trabajo hace parte del Proyecto 608669148571 financiado por la empresa Pavimentar S.A. y ejecutado por Corasfaltos a través de la convocatoria 691-2014 de Colciencias.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. José Luis Agudelo Valderrama. Co-Director: PhD. Alexei Chiman

ABSTRACT

TITLE: ASPHALT BINDERS FROM CHEMICAL MODIFICATION OF COLOMBIAN HEAVY CRUDES*

AUTHOR: MARÍA PAULA MARTÍNEZ PARADA**

PALABRAS CLAVES: HEAVY CRUDE, ASPHALT BINDER, CHEMICAL MODIFICATION, ASPHALT PENETRATION, ADHESION.

DESCRIPTION: Obtaining asphalt from petroleum distillation is a complex process with a lot of energy use and is not an ecologic process. Considering that Colombian heavy crudes are an alternative raw material in order to get asphalt binders, Corasfaltos Corporation has achieved developments in processes that tend to raise the viscosity of those heavy crudes with the purpose of giving them properties to be useful in road construction.

In this research, three Colombian heavy crudes were selected and were practiced different modifications experiments in laboratory with different components in order to determine the right composition that give them basic properties of asphalt binders. In order to prove that the method is technically feasible, scale-up tests were practiced in a batch reactor and three asphalt binders were obtained. According to the actual laws, the asphalt binders were characterized with tests that show their quality, suitability and performance. The tests were penetration, ductility, softening point, dynamic viscosity and aging by RTFOT and PAV. Besides, two complementary tests were practiced: determination of complex module and stiffness.

As a result, the asphalt binders presented good physicochemical characteristics, which would allow their use as asphalt binders in second and third order ways, for example in nearby zones where those heavy crudes are produced.

This investigation is part of the Project 608669148571, economically funded by Pavimentar S.A. and executed by Corasfaltos through the call 691-2014 of Colciencias.

* Bachelor Thesis

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: PhD. José Luis Agudelo Valderrama. Co-Director: PhD. Alexei Chiman

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un factor importante para el crecimiento económico y desarrollo social de cualquier país. Sin embargo, su construcción y mantenimiento requiere una inversión sustancial de recursos. Las vías que conforman el Sistema Nacional de Carreteras o Red Vial Nacional se clasifican en: arteriales o de primer orden, intermunicipales o de segundo orden y veredales o de tercer orden [1].

El pavimento es la superestructura de la obra vial que hace posible el tránsito de los vehículos. Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos definidos así por las características y estructuración de los materiales que los constituyen. Los pavimentos flexibles (denominados así, porque admiten algunos grados de deformación) están formados en general por sub-base, base y capa de pavimento. En la base y sub-base se emplean agregados pétreos. La capa de pavimento se fabrica con agregados pétreos y asfalto [2].

El asfalto o ligante asfáltico es un material aglomerante, viscoso, impermeable, adhesivo y resistente de color negro [3]. Los asfaltos son obtenidos principalmente como residuos de los procesos de destilación atmosférica o por medio de la destilación al vacío del petróleo, como extractos del proceso de producción de aceites lubricantes o mediante procesos de craqueo térmico. Empleado en la construcción de vías, puede impermeabilizar la estructura del pavimento, proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados para resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos [4].

Entre las propiedades físicas más importantes del asfalto se destacan la durabilidad, definida como la capacidad de mantener las características físicas y mecánicas con el tiempo, a pesar de que el asfalto sea expuesto a condiciones normales de degradación y envejecimiento; la adhesión y la cohesión, que hacen referencia, la primera, a la capacidad del asfalto para adherirse a la superficie de los agregados pétreos y, la segunda, a la capacidad del asfalto de mantener la unión entre sus moléculas; la susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento, fenómenos que son causados por una combinación de factores físicos y químicos entre los que se destacan la acción del oxígeno (oxidación) y la volatilización; la susceptibilidad a la temperatura es una de las propiedades más importantes del asfalto, ya que hace referencia a la naturaleza termoplástica del mismo y es la responsable de su comportamiento como un sólido elástico a bajas temperaturas o velocidades de carga altas, y como un fluido viscoso a altas temperaturas o velocidades de carga bajas [5].

Alrededor del mundo, se han llevado a cabo estudios en los que los asfaltos modificados con polímeros (típicamente SBS, SBR, ELVALOY, caucho de llanta reciclada, entre otros), han presentado mejoras en sus propiedades físicas. Se ha demostrado que los polímeros aumentan la consistencia los asfaltos, aumentan la temperatura de ablandamiento y permiten un mayor porcentaje de recuperación de forma cuando son sometidos a deformaciones. Las modificaciones de los ligantes con polímeros mejoran las características mecánicas de las mezclas asfálticas (agregado y asfalto) como son: mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento, menor susceptibilidad térmica, entre otras [6]. Cuando se habla de modificar asfaltos, se está haciendo referencia a la interacción física y/o química que se puede llegar a tener entre el ligante y el modificador [7].

Debido a sus características como su baja gravedad API, su elevada viscosidad y su comportamiento relativamente similar al de los asfaltos [29,30], los crudos pesados resultan muy atractivos como materias primas para uso en la pavimentación de vías [8,9]. Sin embargo, los estudios de métodos y técnicas de transformación de crudos pesados para ser utilizados como ligantes asfálticos en la construcción de vías sin ser sometidos al proceso de refinación son pocos. Uno de los estudios, es el desarrollado por la corporación Corasfaltos, en el cual, patentó un procedimiento [10] por medio del cual se modifican crudos pesados a través de tratamientos térmicos y químicos con ácido sulfúrico y cal hidratada para luego ser mezclados con los agregados. Tal patente sirvió de base para el desarrollo de un nuevo procedimiento el cual se presenta en este trabajo, la cual consiste en el tratamiento térmico de crudos pesados en presencia de una alsfaltita mineral y un polímero natural con los cuales se logra ajustar la composición química y otorgarles características de ligantes asfálticos.

En el presente estudio, se seleccionaron tres crudos pesados y se realizaron diferentes formulaciones en laboratorio a fin de determinar la composición adecuada que permitiera darles propiedades básicas de ligantes asfálticos. Posteriormente se escalaron las formulaciones en un reactor *batch* y se obtuvieron tres ligantes asfálticos que fueron caracterizados mediante ensayos tales como penetración [17], ductilidad [18], punto de ablandamiento [19] y viscosidad [21]. Para complementar la caracterización fisicoquímica también se realizaron pruebas establecidas por el sistema SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) como: determinación del módulo complejo “G*” con el reómetro de corte dinámico [22] y deflexión de un ligante bajo carga constante con el reómetro de viga a flexión [25]. A los ligantes se les practicó una simulación del envejecimiento sufrido durante el mezclado con los agregados, la cual se realizó con base en el procedimiento establecido en la norma INV E-720 para el ensayo

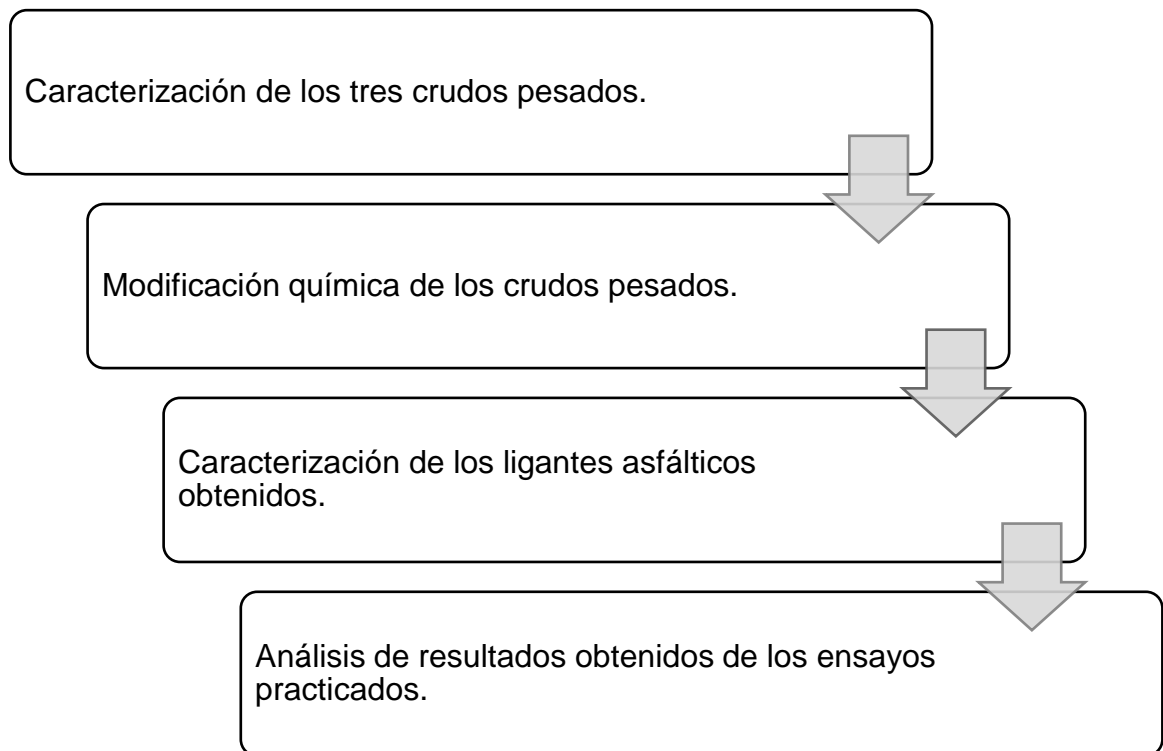
de lámina delgada y rotatoria RTFOT, y la norma INV E-751 para el ensayo por cámara de envejecimiento a presión PAV, el cual simula el envejecimiento en servicio.

1. PROCEDIMIENTO

1.1 METODOLOGÍA

La metodología empleada durante esta investigación se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Metodología usada en el desarrollo del proyecto.



1.2 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS PESADOS COLOMBIANOS

Los procedimientos llevados a cabo para la caracterización de los crudos usados en la investigación, se describen a continuación.

1.2.1 Determinación del contenido de agua: El método se basa en la destilación a reflujo de una muestra de crudo, conjuntamente con un solvente volátil no miscible con el agua, en este caso, se usó xileno. El conjunto se calienta y, al condensarse, el solvente cae en un colector graduado del equipo arrastrando el agua que se separa después, formando una capa inferior. El exceso de solvente rebosa y vuelve al matraz. La norma de ensayo que se siguió para determinar el contenido de agua fue la INV E-704-13 [11]. Las fotos del montaje del ensayo se muestran en el Anexo A.

1.2.2 Densidad Relativa: La muestra de crudo es colocada en un picnómetro calibrado. El picnómetro y la muestra son pesados, luego queda un remanente de volumen (si se trata de materiales sólidos o semisólidos, en caso contrario no hay remanente) el cual es completado con agua. El picnómetro lleno es colocado en un baño a temperatura y se le determina su masa. La densidad de la muestra se calcula considerando la masa de la muestra y la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno. La medida de gravedad API, es una medida de densidad que, en comparación con el agua a temperaturas iguales, precisa cuán liviano o pesado es la muestra. La norma de ensayo que se siguió para determinar la densidad relativa fue la INV E-707-13 [12]. Las fotos del montaje del ensayo se muestran en el Anexo B.

1.2.3 Composición química de crudos del petróleo: Un esquema de análisis de composición simple consiste en dividir un crudo en saturados, aromáticos, resinas

y asfaltenos (fracción SARA) [13]. El análisis SARA consiste en el fraccionamiento de la muestra en las cuatro composiciones mencionadas, expresándolas como porcentaje en peso. El fraccionamiento SARA hace en primer lugar una separación mediante precipitación con hidrocarburos saturados de bajo peso molecular (n-heptano o n-pentano), obteniéndose dos fracciones; a la fracción insoluble se le denomina asfaltenos y a la soluble, maltenos; éstos últimos a la vez contienen varios tipos de hidrocarburos que se dividen en saturados, aromáticos y resinas. La norma de ensayo que se siguió para determinar la composición química de los crudos fue la ASTM D4124-09 [14].

1.3 MODIFICACIÓN QUÍMICA DE CRUDOS PESADOS

Para la modificación se realizó previamente una serie de experimentos en laboratorio con cada crudo usando cantidades pequeñas (típicamente menos de 200 g de mezcla) en recipientes metálicos, planchas de calentamiento y con agitadores mecánicos. Esto con el fin de establecer los porcentajes de los componentes (crudo, asfaltita, polímero, copolimerizador y catalizador) adecuados para obtener ligantes asfálticos de buena manejabilidad y con valores de penetración en los rangos 80/100 o 60/70. En el Anexo C, se puede observar los porcentajes que se usaron en la serie de experimentos previos.

Las combinaciones de materiales con las cuales se obtuvieron las características deseadas en los ligantes asfálticos y que a su vez corresponden a los ligantes asfálticos finalmente empleados para su evaluación en la investigación fueron:

- Ligante 1: Crudo 71,5 %; asfaltita 20%; catalizador 6%; polímero 2%; copolimerizador 0,5%.
- Ligante 2: Crudo 83,5%; asfaltita 11%; catalizador 3%; polímero 2%; copolimerizador 0,5%.
- Ligante 3: Crudo 68,5%; asfaltita 26%; catalizador 3%; polímero 2%; copolimerizador 0,5%.

Para la modificación escalada de los tres crudos pesados con el procedimiento desarrollado se empleó un reactor *batch* de 50 L de capacidad agitado mecánicamente, de calentamiento eléctrico y con control de temperatura. En la Figura 2 se muestra una imagen del reactor usado en la modificación escalada.

En el procedimiento llevado a cabo para la modificación química de crudos, cada uno de los componentes se fue incorporando consecutivamente al reactor, permitiendo dispersión completa después de cada adición. Se usó una agitación de 400 rpm durante toda la modificación. Las variables de tiempo de mezcla y temperatura de mezcla fueron 4.5h y 170°C, respectivamente, para los tres procesos de modificación.

Figura 2. Reactor *batch* en donde se realizaron las modificaciones de los crudos pesados.



El paso a seguir luego de que el crudo estuviera a la temperatura de mezcla escogida y con agitación continua, fue agregar el mineral escogido (asfaltita), el cual fue triturado y pasado previamente por un tamiz No. 30 con el fin de que obtener un tamaño de partícula uniforme y pequeño, y de esa manera disminuir el tiempo de dispersión. La asfaltita aporta importantes características tales como: aumentar la viscosidad del ligante a altas temperaturas, producir menor susceptibilidad térmica, disminuir ahuellamientos y desprendimientos, mejorar la adherencia asfalto-agregado y aumentar la resistencia a la acción de deterioro producida por el agua [15]. Para garantizar la completa dispersión del mineral en el crudo, se dejó en agitación durante una hora.

Luego de este tiempo, se adicionó un catalizador, el cual, acondiciona la reacción de polimerización. Luego de media hora de agitación continua, cuando estuvo homogénea la mezcla, se prosiguió agregando el polímero natural. El polímero que se adicionó lentamente mediante un dosificador, se obtiene comercialmente en forma suspensión en agua. Debido a su alto contenido de agua, se adicionó de manera lenta para evitar derrames debido a la súbita evaporación del agua que forma burbujas y expanden la mezcla; y además para garantizar que el polímero se distribuye uniformemente en la mezcla. Se prosiguió dejando la mezcla durante 1h. Por último, se agregó un co-polimerizador, el cual por un proceso de vulcanización ayuda a la formación de una red entrecruzada constituida por la unión de las diferentes cadenas poliméricas, lo cual aporta al ligante elasticidad y resistencia [16]. Finalmente, se dejó una hora en constante agitación.

Durante todo el proceso, se aseguró una permanente agitación y control adecuado de temperatura. Esto último es importante, ya que de un buen control de la temperatura depende que se obtenga un producto con las características deseadas.

1.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS LIGANTES OBTENIDOS

Para la evaluación de las propiedades de cada uno de los ligantes obtenidos (tres) se usaron ensayos estándares, definidos por Invías, los cuales se presentan a continuación:

1.4.1 Penetración: Es la propiedad que mide la consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra de asfalto, bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura, en este caso se realizó a 25°C, 5 segundos y una carga móvil total de 100 g. La norma de ensayo que se siguió para determinar la penetración fue la INV E-706-13 [17]. El instrumento usado en la medición de la penetración es el penetrómetro, y la foto del equipo se encuentra en el Anexo D.

1.4.2 Ductilidad: Es la propiedad que mide la distancia máxima en centímetros que se estira una muestra de asfalto hasta el instante de ruptura. El procedimiento

consiste en sumergir una muestra del material asfáltico en un baño de agua a una temperatura constante de 25°C. A la muestra del ligante, el equipo lo extiende por tracción a una velocidad controlada constante de 5 cm/min. La muestra de asfalto se estira hasta que el hilo sufre la ruptura, instante en el cual se mide la longitud de elongación. Esta medida en centímetros se denominada ductilidad del asfalto. La norma de ensayo que se siguió para determinar la ductilidad fue la INV E-702-13 [18]. El instrumento usado en la medición de la ductilidad es el ductilímetro, y la foto del equipo se encuentra en el Anexo E.

1.4.3 Punto de ablandamiento: Esta prueba se utiliza para determinar la temperatura en la que el ligante asfáltico cambia del estado sólido al estado líquido. La prueba se realiza con dos discos horizontales de asfalto, los cuales han sido vaciados en dos anillos de latón; son calentados a una rata controlada de 5°C/min en un baño líquido mientras que cada uno soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento es reportado como la medida de la temperatura a la cual los dos discos ablandan suficiente para permitir que cada bola, envuelta en asfalto caiga una distancia de 25 mm. La norma de ensayo que se siguió para determinar el punto de ablandamiento fue la INV E-712-13 [19]. El método de anillo y bola es generalmente usado para determinar el punto de ablandamiento del asfalto, la foto del montaje del ensayo se encuentra en el Anexo F.

1.4.4 Susceptibilidad térmica: Los ligantes asfálticos utilizados en pavimentación son materiales termoplásticos, cuya consistencia a muy bajas temperaturas es la de un sólido rígido, viscoelástico a temperaturas intermedias y líquido viscoso a altas temperaturas, lo que hace importante conocer la variación de la consistencia

con respecto a la temperatura. La forma más usual para evaluar el cambio de la consistencia del asfalto con la temperatura es la susceptibilidad térmica. La norma de ensayo que se siguió para determinarla fue la INV E-724-13 [20]. Los valores de la susceptibilidad, se pueden obtener a partir de los datos de penetración a 25°C y punto de ablandamiento así:

$$\frac{P_{25}}{TPA}$$

Donde P25 es el valor de la penetración a 25°C (mm/10), y TPA es la temperatura o punto de ablandamiento (°C).

1.4.5 Viscosidad de asfaltos: Esta prueba se realiza con el fin de determinar la viscosidad, expresada en Poises, de los materiales asfálticos a una temperatura de servicio de 60°C. Es necesaria para evaluar el comportamiento del asfalto a las máximas temperaturas de desempeño en el pavimento. El procedimiento consiste en medir el tiempo necesario para que un volumen fijo de líquido fluya a través de un tubo capilar por acción del vacío. La viscosidad se calcula multiplicando el tiempo de flujo, en segundos, por el factor de calibración del viscosímetro, el cual es el instrumento utilizado en la medición de la viscosidad de los asfaltos. La norma de ensayo que se siguió para determinar la viscosidad fue la INV E-716-13 [21]. La foto del equipo se muestra en el Anexo G.

1.4.6 Determinación del módulo de corte complejo: El comportamiento visco-elástico de los ligantes asfálticos puede ser estimado mediante el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ), los cuales son medidos por medio del

reómetro de corte dinámico (DSR por las siglas en inglés de Dynamic Shear Rheometer). Se colocan las muestras de los ligantes entre dos placas, una fija y una oscilante, las muestras son sometidas a esfuerzo o deformación constante por la placa oscilatoria. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-750-13 [22]. El equipo usado fue el AR 2000, su foto se muestra en el Anexo H.

1.4.7 Envejecimiento de los ligantes en el horno rotatorio de lámina delgada:

Los ligantes fueron sometidos al ensayo de envejecimiento en el horno rotatorio de lámina delgada (RTFOT), el cual consistió en someter el asfalto a 163°C en un horno diseñado y construido con un plato móvil, por un período de tiempo de 85 min, con un flujo de aire continuo de 4000 mL/min. Este ensayo tiene dos finalidades: la primera es producir un ligante oxidado para emplearse en ensayos adicionales (DSR y material base para PAV), y como segunda finalidad determinar la cantidad de volátiles perdidos, como indicador del envejecimiento que puede ocurrir durante el tiempo de servicio. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-720-13 [23]. El equipo para realizar este envejecimiento se muestra en el Anexo I.

1.4.8 Cámara de envejecimiento a presión: La práctica estándar para envejecimiento acelerado de ligante asfáltico usando una cámara de envejecimiento a presión (PAV, por sus siglas en inglés), consistió en mantener una muestra de asfalto envejecido en película delgada, bajo 300 psi de presión de aire, a 100°C de temperatura, por un período de 20h, a fin de simular y predecir el comportamiento del ligante asfáltico luego de varios años de servicio. La norma

que se siguió para el procedimiento fue la INV E-751-13 [24]. La cámara de envejecimiento a presión se muestra en el Anexo J.

1.4.9 Determinación de la rigidez a la flexión por fluencia del ligante asfáltico:

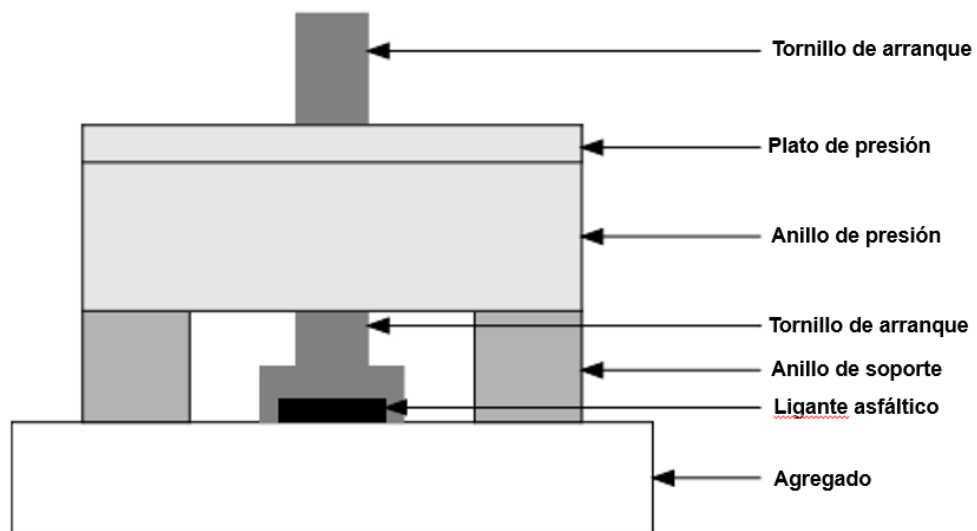
El método de ensayo estándar para la determinación de la rigidez a la flexión por fluencia del ligante asfáltico usando un reómetro de barra flexible (BBR, por sus siglas en inglés), consiste en determinar la resistencia a la flexión del residuo asfáltico procedente de la cámara de envejecimiento a presión PAV, a temperaturas por debajo de 0°C. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-752-13 [25]. El reómetro de barra flexible se muestra en el Anexo K.

1.4.10 Ensayo de adherencia del bitumen: El ensayo BBS, por sus siglas en inglés, permite evaluar cuantitativamente la adhesión entre el asfalto y el agregado o las fuerzas cohesivas internas del asfalto, dependiendo del modo de falla de la unión asfalto-agregado. La norma que se siguió para el procedimiento fue la AASHTO TP-91-11 [26]. La principal ventaja del ensayo BBS es que se ha podido comprobar su simplicidad, rapidez y repetitividad.

El equipo usado en la realización del ensayo BBS es el PATTI (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument), el cual está compuesto por un medidor neumático, mangueras de presión, pistón, placa de reacción y un tornillo de arranque. El equipo puede observarse en el Anexo L.

Este ensayo cuantifica la tensión necesaria para remover un tornillo de arranque adherido a un sustrato sólido con ligante asfáltico. Las muestras son preparadas en un ambiente controlado de temperatura y humedad. Luego del acondicionamiento, una carga neumática es aplicada al tornillo de arranque hasta la falla. El valor de la fuerza de tensión en la falla es usado para describir las propiedades adhesivas del ligante asfáltico y la compatibilidad entre agregado y ligante asfáltico [27].

Figura 3. Representación esquemática del montaje para el ensayo BBS.



Los agregados utilizados en este ensayo fueron el granito y el mármol. El primero de ellos se escogió debido a que está compuesto por óxido de silicio, el cual es el componente principal en los agregados pétreos usados en las mezclas asfálticas. El mármol se escogió debido a que tiene un carácter básico y el asfalto generalmente tiene un carácter ácido, por lo cual se esperaba que las fuerzas de adhesión fueran mayores.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS PESADOS

Los valores de las propiedades fisicoquímicas de los crudos empleados como materia prima para el proceso de transformación en ligantes asfálticos se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 1. Características de crudos pesados colombianos usados.

Propiedad	Unidades	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3
Contenido de agua	% volumen	0,25	0,0	0,0
Densidad Relativa (Gravedad Específica)	Adimensional	0,97	0,98	0,99
Gravedad API	°API	12,9	11,7	10,4

Dado que los grados API son mayores de 10 pero menores de 20, los tres crudos clasifican como crudos pesados. El crudo 1 presenta mayor valor, seguido por el crudo 2 y por último el crudo 3.

2.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos mediante el método de SARA en columna tanto de los crudos como de los ligantes obtenidos luego de la modificación química.

Tabla 2. Composición química de las muestras, tanto de los crudos pesados como de sus ligantes asfálticos.

	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
Crudo 1	31,6	31,6	23,9	12,9
Ligante 1	29,5	26,5	14,8	29,2
Crudo 2	31,7	11,3	37,8	19,2
Ligante 2	18,7	31,3	20,9	29,1
Crudo 3	36,6	34,3	25,2	3,9
Ligante 3	19,7	28,3	27,9	24,1

Se observa que el contenido de asfaltenos aumentó para todos los ligantes asfálticos obtenidos con respecto del contenido de los crudos del cual provienen.

En las demás fracciones se observa un comportamiento variable en cuanto a disminución o aumento si se comparan con el análisis SARA de los crudos de los cuales provienen. Esto sugiere que el proceso de transformación es específico para cada crudo, planteamiento que puede ser validado con los diferentes porcentajes de los reactivos empleados para lograr las características deseadas de los ligantes asfálticos.

2.3 ANÁLISIS CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS MODIFICADOS

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los ligantes asfálticos descritos en el numeral 2.4 se presentan en la Tabla 3.

Como se puede observar en la Tabla 3, las tres muestras presentan un bajo valor de ductilidad ya que, según la norma, para valores de penetración 60/70 y 80/100 se debería obtener un valor de ductilidad mayor a 100 en condiciones a 25°C [18].

El punto de ablandamiento obtenido, comparándolo con los valores de la tabla del Anexo M (los cuales son los valores requeridos por el INVIAS para los asfaltos modificados con polímeros) corresponden a valores ligeramente menores, lo cual es un indicador de que los tres ligantes tendrán comportamiento similar al de un asfalto modificado durante su vida de servicio.

Tabla 3. Características fisicoquímicas de los ligantes asfálticos obtenidos.

Propiedad	Ligante 1	Ligante 2	Ligante 3	Norma de referencia
Penetración de los ligantes; (0,1mm)	89,0	65,7	95,0	INV E-706-13
Ductilidad de los ligantes asfálticos; (cm)	8,1	14,5	20,3	INV E-702-13
Punto de ablandamiento de ligantes asfálticos; (°C)	57,0	54,6	50,3	INV E-712-13
Susceptibilidad térmica; (adimensional)	+2,4	+0,6	+0,8	INV E-724-13
Viscosidad de ligantes; (Poises)	14017	11134	6197	INV E-716-13

Penetración de los ligantes asfálticos, luego de RTFOT; (0,1mm)	21,7	16,8	36,0	INV E-706-13
Ductilidad de los ligantes asfálticos, luego de RTFOT; (cm)	3,5	4,6	7,4	INV E-702-13

En cuanto a la susceptibilidad térmica, el ligante asfáltico de crudo 1, a diferencia de los otros, tiene un valor mayor a +1, lo cual significa que es un ligante asfáltico con poca susceptibilidad a la temperatura y que presenta cierta elasticidad. Por otro lado, los ligantes 2 y 3, presentan susceptibilidad intermedia a la temperatura. Los valores entre +1 y -1, los poseen la mayoría de los asfaltos que se usan en la construcción de carreteras [19] y por tanto, los ligantes 2 y 3 son los que poseen valores deseables.

Luego del envejecimiento por horno rotatorio de lámina delgada, se observa que tanto el valor de penetración como el de ductilidad disminuyen en los tres casos. La penetración para el ligante 1 disminuye un 76%, para el ligante 2, 74% y para el ligante 3, 62%. La ductilidad para el ligante 1 disminuye un 56%, para el ligante 2, 68% y para el ligante 3, 62%. Esta disminución es de esperar debido a que, al usarse altas temperaturas en el ensayo, se volatilizan algunos productos ligeros y, por ende, las propiedades cambian, como lo harían en condiciones de servicio.

En general, los resultados obtenidos con las muestras modificadas de crudo y comparando dichos valores con los valores especificados por el Instituto Nacional de Vías, para los cementos asfálticos modificados con polímeros, en el artículo

400-07 “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y caliente y reciclado de pavimentos asfálticos” (ver Anexo M), se observa que a pesar de que ningún ligante obtenido cumple a cabalidad con los valores especificados, debe resaltarse que los valores especificados por INVIAS son para carreteras de primer orden, es decir, de gran cantidad de tráfico, por tanto, los ligantes obtenidos al tener valores cercanos a los especificados, se podrían usar como ligantes asfálticos para carreteras de segundo y tercer orden (media y baja cantidad de tráfico).

De acuerdo a los resultados, es preciso correlacionar algunos parámetros medidos. La penetración es una medida de la consistencia de los materiales asfálticos, altos valores de penetración indican que el material es más blando que si tuviera valores menores de penetración; el ligante 3 presentó el mayor valor de penetración seguido por el ligante 1 y por último el ligante 2. Coincide que el ligante 3 además de tener el mayor valor de penetración, tenga el menor contenido de asfaltenos, lo cual, es coherente en el sentido de que los asfaltenos son los compuestos más pesados que componen al ligante. Lo anterior se comprueba porque el ligante con el mayor porcentaje de asfaltenos (ligante 2), es también el ligante con menor valor de penetración.

Ahora bien, cuanto más blando es el material, es menos viscoso, es decir, el ligante tendrá menor resistencia a fluir. El ligante 3, es el más blando y es el que presentó menor valor de viscosidad, sin embargo, esto no cumple para el ligante 2 que fue el menos blando pero no fue el más viscoso. Es posible que este resultado haya sido afectado porque el ligante 2 fue el que mayor porcentaje de crudo tuvo,

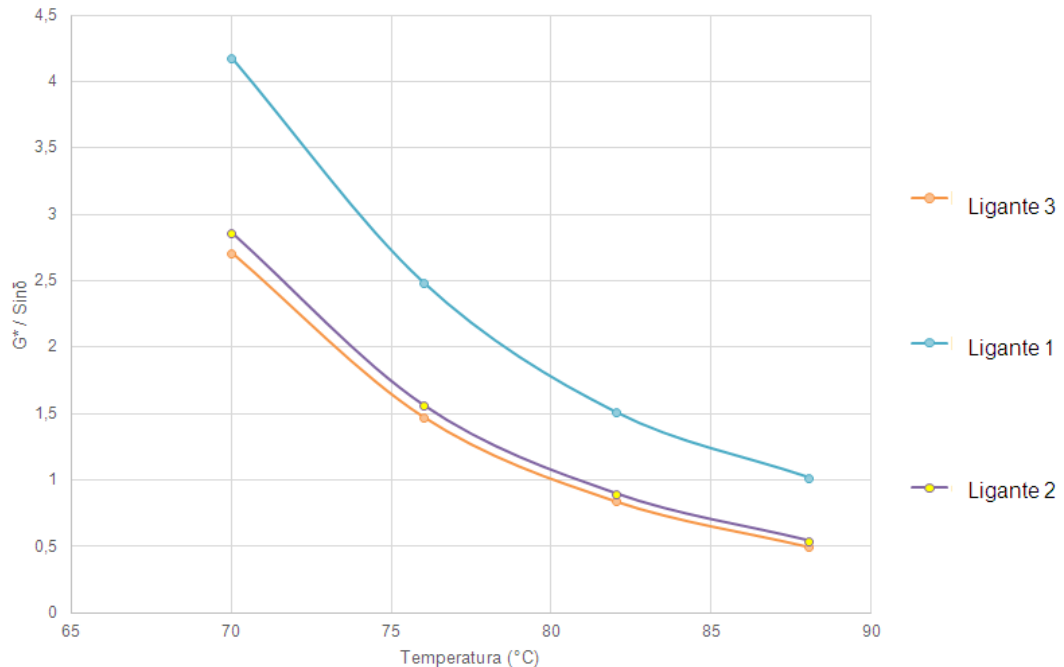
el cual a su vez, contiene la mayor cantidad de asfaltenos y por ende, a pesar de tener el menor valor de penetración, no es el más viscoso. En síntesis, las características propias de cada crudo determinan las características de los ligantes obtenidos.

2.4 ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE, FISURA A LA FATIGA Y DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO

Los datos obtenidos del ensayo toman en cuenta dos valores importantes: el módulo de corte complejo, el cual mide cantidad de energía necesaria para deformar el asfalto, y el ángulo de fase, el cual es un indicador de la proporción de la deformación recuperable y no recuperable [32]. Estos resultados se muestran en el Anexo N.

En la Figura 4 se comparan los valores del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{Sin}\delta$) para los ligantes sin envejecer en función de la temperatura. Se observa que los ligantes obtenidos de los crudos 2 y 3 presentan valores similares y, por su parte, el ligante proveniente del crudo 1, presenta a medida que aumenta la temperatura, valores mayores del factor, lo cual implica un comportamiento más cercano al de un sólido elástico y por tanto, ofrecerá mayor resistencia al ahuellamiento que los otros dos ligantes.

Figura 4. Factor de ahuellamiento para los ligantes de tres crudos a diferentes temperaturas.



En cuanto a los factores de agrietamiento por fatiga ($G^* \times \text{Sin}\delta$, presentados en la Tabla 10, 11 y 12, Anexo N) el ligante proveniente del crudo 1 presenta un menor valor en el ángulo de fase, por lo cual tiene un comportamiento más cercano al de un material elástico blando en comparación a los otros dos; por esta razón se flexiona repetidamente y recobra su forma original mejor que las otras dos muestras. La cualidad de funcionar como un material elástico blando y recuperarse de la deformación por las cargas es una cualidad deseable del ligante para resistir el agrietamiento por fatiga.

El grado de desempeño (Performance Grade, PG) indica las temperaturas máxima y mínima en las que se garantiza un buen comportamiento del ligante asfáltico. Éste se obtiene de las temperaturas a las cuales los ligantes cumplen con las especificaciones SUPERPAVE en los ensayos DSR y BBR, en donde el primero brinda la máxima temperatura y el segundo la mínima.

Con los resultados obtenidos, es posible afirmar que los ligantes asfálticos tendrán un mayor rango de desempeño que un asfalto de refinería de las mismas características. Esto teniendo en cuenta que generalmente un asfalto 60/70 presenta un PG de 64-22, rango de desempeño que es menor para un asfalto 80/100 (PG 58-22). En este caso, los ligantes asfálticos obtenidos aunque difieren en clasificación de acuerdo a su penetración, presentan el mismo grado de desempeño (PG) de 76-16. Esta tendencia al incremento de la temperatura de falla se puede entender como el incremento en la rigidez del ligante, originado por la incorporación de polímero, lo cual se traduce en un mejoramiento en el grado de desempeño PG [11].

El grado de desempeño del ligante asfáltico obtenido del crudo 1 no pudo ser determinado debido a que el Valor M (es el valor que representa la tasa de cambio de la rigidez en función del tiempo, y es calculado automáticamente por la computadora) del ensayo del reómetro de viga de flexión (BBR) no cumple con la condición de un valor mínimo de M de 0,300 a ninguna de la temperaturas ensayadas desde 0°C, temperatura a la cual se rompió la viga y por lo cual no se pudo obtener un resultado.

2.5 EFECTO DEL PROCESO DE MODIFICACIÓN EN LA ADHERENCIA LIGANTE ASFÁLTICO-AGREGADO

La fuerza del enlace establecido entre cada ligante asfáltico y los minerales presentes en los agregados empleados en la fabricación de mezclas asfálticas fue evaluada mediante el ensayo de adherencia del bitumen (BBS). Los resultados obtenidos en el ensayo usando un asfalto convencional de refinería 60/70, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia a la tensión del asfalto convencional en diferentes agregados.

AGREGADO: MÁRMOL		AGREGADO: GRANITO	
MUESTRA	Asfalto convencional	MUESTRA	Asfalto convencional
POTS1 (psi)	106,28	POTS1 (psi)	90,31
POTS2 (psi)	108,78	POTS2 (psi)	88,81
PROMEDIO (psi)	107,53	PROMEDIO (psi)	89,56
DS	1,77	DS	1,06
TIPO FALLA	Cohesiva	TIPO FALLA	Cohesiva

Los resultados de los ensayos con los ligantes asfálticos obtenidos se muestran en la Tabla 5 y 6.

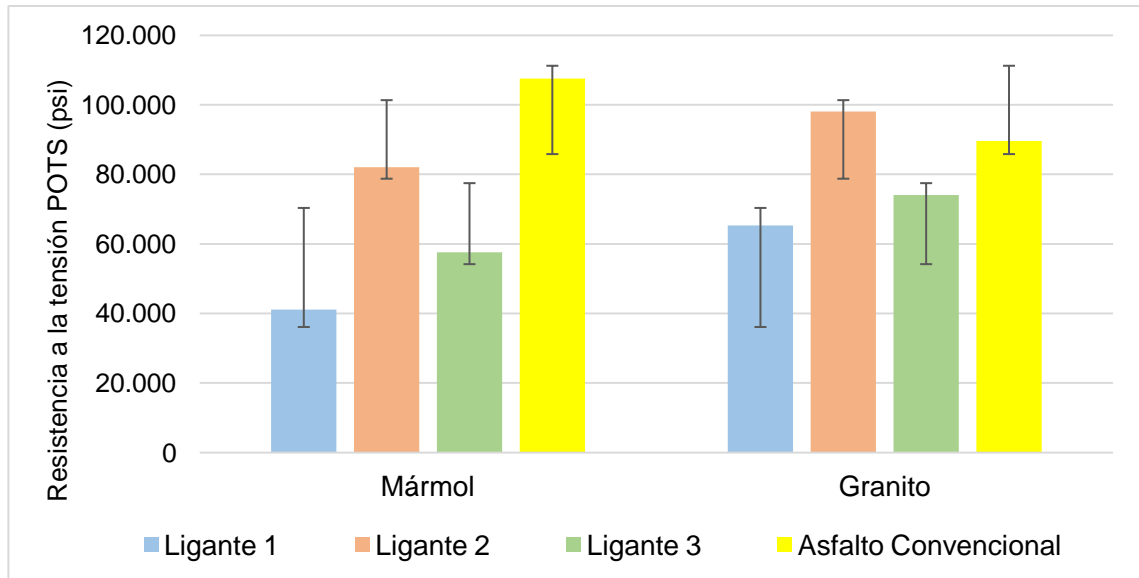
Tabla 5. Resistencia a la tensión de los diferentes ligantes obtenidos, con mármol como agregado.

AGREGADO: MÁRMOL			
MUESTRA	1	2	3
POTS1 (psi)	41,38	82,32	58,36
POTS2 (psi)	40,88	81,82	56,86
PROMEDIO (psi)	41,13	82,07	57,61
DS	0,35	0,35	1,06
TIPO FALLA	Cohesiva	Cohesiva	Cohesiva

Tabla 6. Resistencia a la tensión de los diferentes ligantes obtenidos, con granito como agregado.

AGREGADO: GRANITO			
MUESTRA	1	2	De 3
POTS1 (psi)	71,34	99,79	77,83
POTS2 (psi)	59,35	96,29	70,34
PROMEDIO (psi)	65,34	98,04	74,08
DS	8,47	2,47	5,29
FALLA	Cohesiva	Cohesiva	Cohesiva

Figura 5. Fuerza de adhesión ligante asfáltico – agregado.



En la Figura 5, se observa que el ligante 2 obtiene en ambos casos un mayor valor de resistencia a la tensión con respecto a los otros ligantes. Es posible que este comportamiento se deba a la composición del crudo del cual proviene, ya que el crudo 2 contiene mayor cantidad de asfaltenos que los otros dos. Los asfaltenos son los compuestos que poseen las estructuras químicas más complejas y los más altos pesos moleculares [31].

De los resultados, se observa que todos los ligantes presentaron una mayor fuerza de adhesión con el granito. Es un resultado satisfactorio, debido a que los agregados empleados en mezclas asfálticas tienen un carácter ácido a intermedio al igual que el granito entonces, es posible predecir que los ligantes asfálticos obtenidos a partir de los crudos pesados empleados tendrán una afinidad química adecuada para su uso en mezclas asfálticas.

El tipo de falla se determina de forma cualitativa, observando las huellas que deja el ligante luego de arrancado el tornillo (ver Figura 21, Anexo L). El tipo de falla que se presentó en todos los casos fue cohesiva, lo cual concuerda con los resultados obtenidos del asfalto convencional. El tipo de falla cohesiva significa que las fuerzas de adhesión de la interface ligante asfáltico-agregado fueron mayores que las fuerzas internas de cohesión de los ligantes.

3. CONCLUSIONES

- El procedimiento de modificación de crudos pesados colombianos aplicado en esta investigación permite obtener ligantes asfálticos y es factible técnicamente. A pesar que algunos de los valores de las propiedades de los ligantes obtenidos estuvieron por debajo de las especificaciones establecidas para los asfaltos convencionales, la investigación permitió identificar que es posible controlar y mejorar tales propiedades mediante cambios en la proporción de los componentes y otras condiciones experimentales.
- El proceso de transformación de crudos pesados en ligantes asfálticos fue validado empleando tres crudos diferentes al escalar las formulaciones desarrolladas en laboratorio. Esto se constató con los valores de las propiedades fisicoquímicas obtenidas para cada uno de los ligantes asfálticos producidos.
- Los crudos pesados seleccionados presentan características que favorecen su uso en el proceso de transformación en ligantes asfálticos.

4. RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio de adherencia bajo condiciones húmedas, tanto para los ligantes obtenidos como para un asfalto convencional, esto con el fin de simular condiciones ambientales húmedas.
- Evaluar el comportamiento de los ligantes en mezclas asfálticas, para validar su posterior aplicación en vías secundarias y terciarias.
- Realizar un estudio económico completo para establecer concretamente la viabilidad de la implementación del procedimiento de modificación de crudos pesados a escala industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEDESARROLLO. Centro de Investigación Económica y Social. Infraestructura regional y pobreza rural. Bogotá D.C.; 2014. 49 p.
- [2] GUTIÉRREZ, Libia. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. En: Agregados. 2 ed. Manizales: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales,. p 27.
- [3] OROZCO, Lizsan Estefhany y ALFONSO, Albert Mauricio. Análisis del comportamiento del asfalto normal y asfalto modificado con caucho por medio de ensayos dinámicos. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2015. 18 p.
- [4] ALBARRACÍN Guillermo y FUENTES Gustavo. Influencia de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica en el módulo de rigidez bajo carga monotónica. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2011. 21 p.
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137743.pdf>
- [5] GARCÍA Weimar. Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente. Tesis Maestría en Ingeniería- Geotecnia. Bogotá D.C.: Universidad

Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Civil y Agrícola, 2013. 27 p.

[6] E-ASPHALT. Asfaltos modificados [online]. Disponible en: <URL:<http://www.e-asphalt.com/modificados/modificados.htm>>. [citado 20 abr., 2016].

[7] LUQUE Hernando y RINCÓN Álvaro José. Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, 2011. 5 p.

[8] ECOPETROL, Instituto Colombiano del Petróleo, Ministerio de transporte & Universidad del Cauca. Crudo 2: Un ligante asfáltico apto para pavimentos. Bogotá, 1999.

[9] CORASFALTOS. Transferencia y desarrollo de tecnología para la construcción de una planta de modificación de asfaltos utilizados en pavimentación, Bucaramanga, 2004. 13 p.

[10] CORASFALTOS. Método de preparación de crudos pesados para elevar su viscosidad. Inventores: L. E. SANABRIA GRAJALES, L. CHIMAN, B. PECHENYI. Fecha de solicitud: 14, febrero, 2002. Colombia, patente de investigación. 2-213003.

- [11] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Agua en los materiales asfálticos por destilación. INV E-704. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [12] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro), INV E-707. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [13] MELÉNDEZ Lesly Viviana y LACHE Adriana. Predicción del análisis SARA de crudos colombianos aplicando espectroscopia FTIR-ATR y métodos quimiométricos Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2010. 25 p.
- [14] VARGAS Gloria Esther. Predicción del análisis SARA de fondos de vacío colombianos utilizando espectroscopía fotoacústica en el infrarrojo medio y métodos quimiométricos. Trabajo de grado Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2011. 17-18 p.
- [15] VILLAMIL Robinson. El asfalto natural como material de construcción de carreteras. Tesis especialización en Ingeniería de pavimentos. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Ingeniería de Pavimentos, 2008. 45 p.
- [16] BILLMEYER, Fred. Textbook of Polymer Science. New York: Reverté, S.A., 2004. 541 p.

- [17] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Penetración de los materiales asfálticos, INV E-706. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [18] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ductilidad de los materiales asfálticos, INV E-702. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [19] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola), INV E-712. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [20] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Índice de penetración de los cementos asfálticos, INV E-724. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [21] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío, INV E-716. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [22] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico, INV E-750. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [23] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria, INV E-720. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

- [24] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando una cámara de envejecimiento a presión (PAV), INV E-751. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [25] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método de ensayo para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante el reómetro de viga de flexión (BBR), INV E-752. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.
- [26] CELY Néstor Edgardo. Estudio de la adhesión y cohesión de tres tipos de agregados pétreos utilizados en Bogotá-Colombia con asfalto 60-70. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil, 2014. 28 p.
- [27] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test. AASHTO TP-91-11
- [28] VILLAMIL Robinson. Op. cit., 41 p
- [29] MELÉNDEZ Lesly Viviana y LACHE Adriana. Predicción del análisis SARA de crudos colombianos aplicando espectroscopia FTIR-ATR y métodos quimiométricos Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2010. 58 p.

[30] REYES Fredy Alberto, DAZA Carlos Enrique y RONDÓN Hugo Alexánder. Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. En: Revista EIA. Julio, 2012. no. 17, p. 47-56.

[31] VARGAS Gloria Esther. Op. cit., 21 p

[32] UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Tecnología de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Junio, 2012, p. 17-26

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test. AASHTO TP-91-11

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. ASTM D4124-09

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Agua en los materiales asfálticos por destilación. INV E-704. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro), INV E-707. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío, INV E-716. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico, INV E-750. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ductilidad de los materiales asfálticos, INV E-702. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria, INV E-720. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Índice de penetración de los cementos asfálticos, INV E-724. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método de ensayo para medir la rigidez en fluencia por flexión a bajas temperaturas mediante el reómetro de viga de flexión (BBR), INV E-752. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando una cámara de envejecimiento a presión (PAV), INV E-751. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Penetración de los materiales asfálticos, INV E-706. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola), INV E-712. Bogotá D.C.: El Instituto, 2013.

ANEXOS

ANEXO A. MONTAJE DEL ENSAYO CONTENIDO DE AGUA EN MATERIALES BITUMINOSOS

Figura 6. Ensayo contenido de agua.



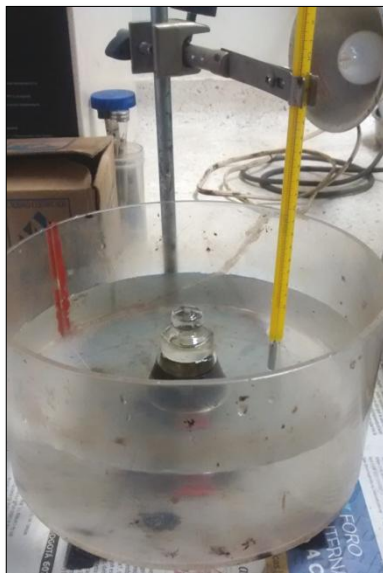
ANEXO B. MONTAJE DEL ENSAYO DENSIDAD RELATIVA

Figura 7. Picnómetro.



Figura 8. Montaje del ensayo Densidad Relativa. a) Baño de acondicionamiento de la muestra a 25°C durante 30 min; b) Toma de peso luego del baño de acondicionamiento

a)



b)



Una forma para clasificar los crudos es conocer el contenido de fracciones destilables y de asfalto residual; para ello, se recurre a pruebas físicas sencillas, como la densidad expresada de un modo arbitrario en grados API, la cual se define como:

De acuerdo con la densidad de los crudos se pueden clasificar en crudos livianos y crudos pesados.

ANEXO C. CANTIDAD DE MODIFICACIONES HECHAS A LOS CRUDOS

Tabla 7. Modificación de crudo 1.

Propiedades	1	2	3	4	5
Crudo (%w/w)	72	71	72,5	71,5	70,5
Asfaltita (%w/w)	17	18	19	20	21
Polímero (%w/w)	3	3	2	2	2
Catalizador (%w/w)	7	7	6	6	6
Copolimerizador (%w/w)	1	1	0,5	0,5	0,5
Penetración	107	96	101	99	89

Tabla 8. Modificación de crudo 2.

Propiedades	1	2	3	4	5
Crudo (%w/w)	85	85,5	83,5	84,5	86
Asfaltita (%w/w)	8	9	11	10	7
Polímero (%w/w)	3	2	2	2	3
Catalizador (%w/w)	3	3	3	3	3
Copolimerizador (%w/w)	1	0,5	0,5	0,5	1
Penetración	117	114	65,7	111	152

Tabla 9. Modificación crudo 3.

Propiedades	1	2	3	4	5
Crudo (%w/w)	64	65,5	65,5	67,5	68,5
Asfaltita (%w/w)	26	26	26	24	26
Polímero (%w/w)	3	2	2	2	2
Catalizador (%w/w)	6	6	6	6	3
Copolimerizador (%w/w)	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Penetración	90	104	75	101	95

ANEXO D. PENETRÓMETRO

Figura 9. Montaje del ensayo de penetración.

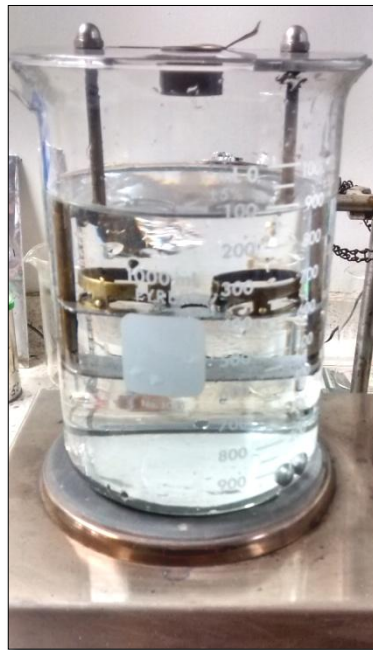


ANEXO F. PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Figura 11. Anillo y bola usados en el ensayo.



Figura 12. Montaje ensayo punto de ablandamiento.



ANEXO G. VISCOSÍMETRO

Figura 13. Viscosímetro Capilar de vacío.



ANEXO H. REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO

Figura 14. Reómetro de corte dinámico.



ANEXO I. ENVEJECIMIENTO POR HORNO ROTATORIO DE LÁMINA DELGADA

Figura 15. Horno rotatorio de lámina delgada. a) Cerrado; b) Abierto.

a)



b)



ANEXO J. CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN

Figura 16. Cámara de envejecimiento a presión.



Figura 17. Muestra después del envejecimiento a presión.



ANEXO K. REÓMETRO DE BARRA FLEXIBLE

Figura 18. Reómetro de barra flexible.



Figura 19. Probeta para el ensayo de flexión.



Fuente: Tomado de referencia [22]

ANEXO L. ENSAYO DE ADHERENCIA DEL BITUMEN

Figura 20. Equipo PATTI (PNEUMATIC ADHESION TENSILE TESTING).

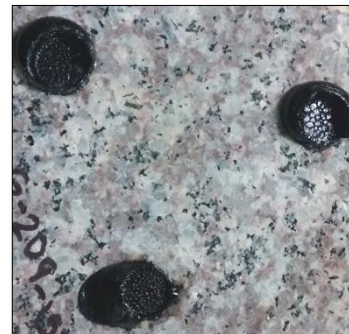


Figura 21. Huellas de ligante luego del ensayo con diferentes agregados: a) Ligante de crudo 2 con mármol como agregado, b) Ligante de crudo 2 con granito como agregado.

a)



b)



El parámetro que se halla en este ensayo es la resistencia a la tracción por arranque (POTS, por sus siglas en inglés), el cual se calcula a través de la siguiente fórmula:

Donde, A_g es el área de contacto entre la huella residual sobre la superficie ensayada (0.98 in^2 en este caso), BP es la presión de arranque mostrada por el equipo (psi), A_{ps} es el área del tornillo de arranque (0.1963 in^2 en este caso), y C es la constante del pistón.

ANEXO M. ESPECIFICACIONES PARA ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS INVIAS

Figura 22. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros.

Tabla 414 - 1. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros

CARACTERÍSTICA	Norma de ensayo INV	TIPO I	TIPO IIa	TIPO IIb	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Asfalto original							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	80 a 130	15 a 40
Punto de ablandamiento, °C, mínimo	E-712	58	58	58	65	60	65
Ductilidad (5° C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	-
Recuperación elástica por torsión a 25° C, %, mínimo	E-727	15	40	40	70	70	15
Estabilidad al almacenamiento (Nota 1)							
- Diferencia en el punto de ablandamiento, ° C, máximo	E-726 y E-712	5	5	5	5	5	5
Contenido de agua, %, máximo	E-704	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, ° C, mínimo	E-709	230	230	230	230	230	230
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo (INV E-720)							
Pérdida de masa, %, máximo	E-720	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8
Penetración del residuo ,en % de la penetración original, mínimo	E-706	65	50	65	65	60	70
Incremento en el punto de ablandamiento, ° C, máximo	E-712	10	10	10	10	10	10
Ductilidad (5° C, 5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	8	8	8	15	-

Nota 1: No se exigirá este requisito cuando los sistemas de transporte y almacenamiento estén provistos de un sistema de homogenización adecuado, aprobado por el Interventor.

**ANEXO N. RESULTADOS ENSAYOS DE GRADO DE DESEMPEÑO (PG) DE
LOS LIGANTES ASFÁLTICOS (CRUDOS MODIFICADOS)**

Tabla 10. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 1.

CRUDO 1				
Prueba, Método			Resultados	Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	 Mínimo 1.0 kPa
88	0,944	67,61	1,021	
94	0,757	66,76	0,824	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFOT)				
Pérdida de masa, RTFOT (%peso) = -8,247				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	 Mínimo 2,20 kPa
100	2,734	59,74	3,165	
106	1,876	61,54	2,134	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (kPa)	 Máximo 5000 kPa
25	12849,000	20,03	4401,800	
22	15694,0	19,69	5287,200	
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), Datos a 60 s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad		Valor	 Mínimo 0.300
-6	Valor M		0,246	
	Rigidez media (MPa)		44	
-12	Valor M		0,230	
	Rigidez media (MPa)		69	
Este asfalto clasifica como un PG INDETERMINADO				

Tabla 11. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 2.

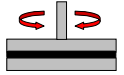
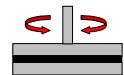
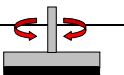
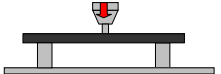
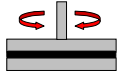
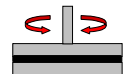
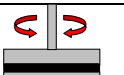
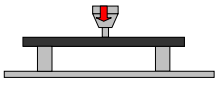
CRUDO 2				
Prueba, Método			Resultados	Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	
76	1,527	77,36	1,565	
82	0,884	79,35	0,900	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFO)				Mínimo 1.0 kPa
Pérdida de masa, RTFO (%peso) = -8,175				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	
118	2,172	64,26	2,412	
124	1,475	65,58	1,619	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				Mínimo 2,20 kPa
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (kPa)	
34	7446,600	34,43	4210,100	
31	9862,900	33,27	5410,500	
				Máximo 5000 kPa
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), Datos a 60s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad		Valor	
-6	Valor M		0,383	
	Rigidez media (MPa)		109	
-12	Valor M		0,257	
	Rigidez media (MPa)		238	
Este asfalto clasifica como un PG +76 - 16				

Tabla 12. Resultados de ensayos de ligante obtenido del crudo 3.

CRUDO 3				
Prueba, Método			Resultados	Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	
76	1,405	71,92	1,478	
82	0,812	74,32	0,843	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFOT)				Mínimo 1.0 kPa
Pérdida de masa, RTFO (%peso) = -5,108				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (kPa)	
88	1,894	67,19	2,054	
94	1,105	70,14	1,175	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				Mínimo 2,20 kPa
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)				
Temperatura (°C)	G* (kPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (kPa)	
25	4404,100	36,77	2636,400	
22	6060,700	35,20	3494,000	
21,6	6496,900	34,96	3722,600	
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), Datos a 60 s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad		Valor	
-6	Valor M		0,353	
	Rigidez media (MPa)		27	
-12	Valor M		0,231	
	Rigidez media (MPa)		31	
Este asfalto clasifica como un PG +76 -16				