



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

VIVAR VIVAR ROBERTO

TUTOR PRINCIPAL

DRA. MARIBEL TRUJILLO VALLADOLID



Cd. Nezahualcóyotl, Edo de México a 28 de marzo del 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:

Secretario:

Vocal 1:

Vocal 2:

Vocal 3:

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería UNAM, Laboratorio de Vías Terrestres.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Maribel Trujillo Valladolid

FIRMA

RESUMEN

El cemento asfáltico es un material de comportamiento visco-elástico, es decir, tiene una conducta elástica y plástica simultáneamente. Es utilizado comúnmente en la construcción de pavimentos para carreteras; para ello se mezcla con agregados pétreos (mezclas en caliente), obteniéndose los denominados concretos asfálticos para pavimentación. Sus características lo vuelven susceptible a la temperatura, a las condiciones ambientales y a la frecuencia de las cargas de tránsito a la que es sometido durante su periodo de servicio.

Con el fin de disminuir su susceptibilidad ante estos agentes, surgió la idea de modificar el cemento asfáltico con polímeros para mejorar sus propiedades físicas y reológicas, a fin de disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación, siendo el cemento asfáltico el más susceptible a estos factores.

Sin embargo, se debe considerar que, al utilizar modificantes en el cemento asfáltico, estos tienden a ser dependientes de los esfuerzos de cortante, adicional a los requerimientos de frecuencia de carga y temperatura antes mencionados (Aguiar et al., 2017). Por lo anterior, los métodos de caracterización, que se basan en mediciones puntuales de algunas propiedades empíricas, como los antiguos métodos de clasificación de cementos asfálticos basados en los ensayos de penetración y viscosidad absoluta, pueden no ser lo suficientemente apropiados para seleccionar un cemento asfáltico que cumplan con los requerimientos necesarios de esfuerzos y condiciones climáticas a los que estará sometido el pavimento.

Teniendo en consideración las dificultades que representaba la correlación idónea para lograr pavimentos asfálticos con una mayor vida útil y un desempeño más eficiente, se desarrolló la metodología de diseño SUPERPAVE, la cual, fue propuesta por Strategic Highway Research Program (SHRP) (McGennis et al., 1998). Esta metodología representa un avance importante en el estudio de los cementos asfálticos, dado que establece ensayos basados en la reología con el fin de asociarlos a las fallas más comunes que presentan los pavimentos asfálticos

como: deformación, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico, tomando en consideración el envejecimiento que sufren los cementos asfálticos durante su proceso de construcción y su periodo de servicio. Además de definir el rango de temperaturas en las cuales un cemento asfáltico va a tener un desempeño eficiente, denominado Clasificación PG.

Por tal motivo, esta investigación tiene como objetivo principal desarrollar una correcta caracterización reológica del cemento asfáltico de acuerdo a los criterios de la SHRP. Dicho procedimiento considera pruebas de envejecimiento del cemento asfáltico a corto y largo plazo, para posteriormente analizar su comportamiento mediante pruebas de Viscosidad Rotacional, Reómetro de Corte Dinámico y Reómetro de Viga a Flexión.

Ante dicha situación se caracterizaron cuatro cementos asfálticos, uno convencional y tres modificados, buscando relacionar el desempeño de un cemento asfáltico convencional en comparación con los modificados para predecir su comportamiento a corto y largo plazo.

ABSTRACT

Asphalt cement is a material with viscoelastic properties, i.e., it exhibits both viscous and elastic characteristics. It is commonly used in the construction of road pavements; in order to do this, it is mixed with stone aggregates (hot mixes) to obtain asphalt concrete for paving. Its characteristics make it susceptible to temperature, environmental conditions, and the frequency of traffic loads to which it is subjected during its service life.

In order to reduce said susceptibility to these factors, the idea to modify asphalt cement with polymers to improve its physical and rheological properties was developed, this will help to decrease its vulnerability to temperature and humidity, as well as to oxidation, as asphalt cement is the most susceptible to these elements.

However, it should be considered that, when using modifiers in asphalt cement, these tend to be shear force dependent, in addition to the aforementioned load frequency and temperature requirements (Aguiar et al., 2017). Therefore, the characterization methods, which are based on punctual measurements of some empirical properties, such as former asphalt cement classification methods based on penetration and absolute viscosity tests, may not be appropriate enough to select an asphalt cement that meets the necessary requirements of force and climatic conditions to which the pavement will be subjected.

Taking into consideration the difficulties that represented the ideal correlation to achieve asphalt pavements with a longer component life and a more efficient performance, the SUPERPAVE design methodology was developed, proposed by the Strategic Highway Research Program (SHRP) (McGennis et al., 1998). This methodology represents an important advance in the study of asphalt cements, as it establishes tests based on rheology in order to associate them with the most common failures of asphalt pavements, such as deformation, fatigue cracking and thermal cracking, taking into account the aging that asphalt cements undergo during their construction process and service life. Additionally, it defines the temperature

range in which an asphalt cement will have an efficient performance, called PG Classification.

Therefore, the main objective of this research is to develop a correct rheological characterization of asphalt cement according to SHRP criteria. This procedure considers short and long term asphalt cement aging tests, to analyze its properties by means of Rotational Viscosity, Dynamic Shear Rheometer and Flexural Beam Rheometer tests.

In light of this situation, four asphalt cements were characterized, one conventional and three modified, seeking to relate the performance of a conventional asphalt cement in comparison with the modified ones in order to predict its short and long term properties.

AGRADECIMIENTOS

Después de finalizar esta investigación, me siento plenamente agradecido con todas las personas que me apoyaron para hacer posible este trabajo, quienes, con sus consejos, palabras de aliento, y aportaciones lograron darme ánimos de no desistir. Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, a quien le debo mi preparación académica.

A mi tutora, la Dra. Maribel Trujillo Valladolid, quiero agradecer de manera muy especial su apoyo brindado, sus consejos, orientación académica y por su amistad, ha sido un honor para mí llevar a cabo esta investigación bajo su asesoría. Gracias por brindarme el acceso al laboratorio de Vías Terrestres.

A mis padres, mi más profundo agradecimiento, ya que fueron los pilares de este logro, jamás me dejaron solo y siempre estuvieron para mí cuando los necesité. A mis hermanos José y Nidia quienes son mis confidentes, mis mejores amigos, gracias por todo, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

A mis sinodales, por aceptar la invitación para ser parte del jurado, por su apoyo cuando fueron mis docentes durante la licenciatura y por su orientación académica.

A los trabajadores del laboratorio de Vías terrestres y amigos que hice, Don Robert, Santiago, Alejandro, Joel, Javi y en especial a Don Francisco y Daniel, gracias por apoyarme cuando acudí a ustedes.

A mis amigos que siempre están presentes, no solo para divertirnos, también cuando se trata de responsabilidad, de apoyarnos mutuamente, Uriel, Juan, Felipe,

Jazael, gracias por su amistad. A mi familia, gracias por su apoyo y afecto, en especial a mis primos Martin, Brenda y Tía Caridad.

DEDICATORIA

Le dedico este logro a mis padres, con mucho amor y admiración, que han sido un ejemplo a seguir de la superación personal y responsabilidad; a mis hermanos quienes son mis mejores amigos, con quienes he pasado y compartido los mejores momentos.

Tabla de Contenido

RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VII
AGRADECIMIENTOS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
I INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
II ANTECEDENTES	18
2.1 Cementos asfálticos.....	18
2.1.1 Comportamiento del cemento asfáltico en función de su temperatura	21
2.2 Envejecimiento en cementos asfálticos.....	23
2.2.1 Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)	26
2.2.2 Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV).....	28
2.3 Métodos para determinar las propiedades de forma empírica y reológica de los cementos asfálticos	30
2.4 Reología en cementos asfálticos	32
2.4.1 Determinación del Grado de Rendimiento (PG)	35
2.4.1.1 Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR).....	41
2.4.1.2 Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR).....	44
2.4.2 Viscosímetro Rotacional (RV)	48
III METODOLOGÍA	50
3.1 Introducción	50
3.2 Materiales	51
3.3 Envejecimiento en cementos asfálticos.....	52

3.4	Determinación del Grado de Rendimiento (PG)	59
3.4.1	Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	59
3.4.2	Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	64
3.5	Viscosímetro Rotacional (RV)	71
IV	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
4.1	Envejecimiento en cementos asfálticos.....	74
4.2	Determinación del Grado de Rendimiento (PG)	77
4.2.1	Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	77
4.2.2	Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	80
4.3	Viscosímetro Rotacional (RV)	81
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones	87
VI	REFERENCIAS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Esquema coloidal de Pfeiffer (Anderson, 2016).	19
Fig. 2 Conformación del cemento asfáltico (Asfáltica revista técnica N. 8, enero 2007)... 20	
Fig. 3 Conducta del flujo del cemento asfáltico (Castillo, 2003).	21
Fig. 4 Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico (Castillo, 2003).	24
Fig. 5 Equipo de Horno Rotatorio de Película Delgada.	27
Fig. 6 Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV).....	29
Fig. 7 Comportamiento de diferentes cementos asfálticos, clasificados con el mismo grado de penetración (Minaya et al., 2006).....	31
Fig. 8 Reología en los materiales (Castillo 2003).	33
Fig. 9 Ensayos Superpave para Caracterización reológica de Asfaltos (Aguiar et al., 2017).	34
Fig. 10 Cemento asfáltico en su estado líquido viscoso, (Aguiar et al., 2007).	35
Fig. 11 Combinaciones posibles del Grado PG.....	36
Fig. 12 Resultados de esfuerzo deformación (McGennis et al., 1998).	38
Fig. 13 Método para calcular el valor de m (McGennis et al., 1998).....	39
Fig. 14 Equipo Reómetro de corte Dinámico (DSR).....	42
Fig. 15 Comportamiento elástico y viscoso, (McGennis et al., 1998).	43
Fig. 16 Mediciones del DSR (McGennis et al., 1998).....	44
Fig. 17 Elementos que conforman el equipo BBR (McGennis et al., 1998).	45
Fig. 18 Elementos que componen la creación de la viga de cemento asfáltico (McGennis et al., 1998).	46
Fig. 19 Principio de la viga a flexión (McGennis et al., 1998).	47
Fig. 20 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional, (McGennis et al., 1998).49	
Fig. 21 Diagrama de la metodología utilizada en la investigación.	50
Fig. 22 Cementos asfálticos utilizados.	51
Fig. 23 Vaciado de cemento asfáltico en vasos de vidrio RTFO.	52
Fig. 24 Vasos en reposo después de verter el cemento asfáltico.....	53
Fig. 25 Interior de Horno RTFO.	54
Fig. 26 Vasos RTFO al final del ensayo.....	55
Fig. 27 Vaciado y pesado de cemento asfáltico en bandejas PAV.....	56
Fig. 28 Bandejas dentro del bastidor y cerrado hermético de Vasija PAV.....	57

Fig. 29 Cemento asfáltico al finalizar prueba PAV.	58
Fig. 30 Cemento asfáltico en equipo desgasificador.	59
Fig. 31 Muestra de cemento asfáltico de 25 mm.	60
Fig. 32 Colocación de la muestra en el equipo DSR.	62
Fig. 33 Exceso de cemento asfáltico en el perímetro de las geometrías y enrasado.....	63
Fig. 34 Aplicación de vaselina en el molde.	65
Fig. 35 Acetatos en el molde.....	65
Fig. 36 Molde de ensayo BBR ensamblado.	66
Fig. 37 Llenado de cemento asfáltico y enrase.	67
Fig. 38 Desmolde de viga.	68
Fig. 39 Colocación de viga de cemento asfáltico sobre los apoyos.....	69
Fig. 40 Deformación de viga BBR.	70
Fig. 41 Termo recipiente y controlador de temperatura.	71
Fig. 42 Vaciado de cemento asfáltico y vástagos del viscosímetro rotacional.	72
Fig. 43 Cápsulas con cemento asfáltico dentro del termo recipiente.....	73
Fig. 44 Viscosidad de Cementos asfálticos.....	83
Fig. 45 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico Convencional.	84
Fig. 46 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 76-22 Us Polycy.....	84
Fig. 47 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 76-22 UP.....	85
Fig. 48 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 70-22 W.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos de Metodología Superpave.....	32
Tabla 2 Clasificación por grado de rendimiento.	40
Tabla 3. Pérdida de masa del cemento asfáltico convencional.	74
Tabla 4. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 70-22 W.	75
Tabla 5. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 76-22 Us Polyco.....	75
Tabla 6. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 76-22 UP.....	76
Tabla 7. Resultados obtenidos en equipo DSR.....	78
Tabla 8. Resultados del ensayo BBR.....	80



I INTRODUCCIÓN

El cemento asfáltico se utiliza ampliamente en la construcción de pavimentos, donde su función principal es aglutinar para unir los agregados. La reología del cemento asfáltico, considera un punto importante la selección del material, poniendo énfasis en cómo se relaciona su composición química y estructural, en su comportamiento mecánico.

En México, para estudiar el comportamiento del cemento asfáltico, se han implementado métodos empíricos con los cuales predecir el comportamiento de un cemento asfáltico en la mezcla asfáltica.

Ensayos simples como la penetración, ductilidad, punto de reblandecimiento anillo y bola, viscosidad, se emplean para clasificar los cementos asfálticos, (Barth, 1984). Sin embargo, distintos estudios demostraron que las medidas puntuales de viscosidad no eran suficientes para describir el comportamiento de los cementos asfálticos, los cuales manifiestan propiedades visco elásticas. La penetración solo describe la consistencia a temperatura media (25° C). Las propiedades a bajas temperaturas no son directamente medidas en el sistema de clasificación y a menudo estos ensayos no caracterizan completamente su comportamiento (McGennis et al., 1998).

Otra desventaja, es que este sistema de caracterización, no evalúa el comportamiento de los cementos asfálticos sobre muestras envejecidas, para simular el envejecimiento durante la etapa constructiva.

Ante esta situación el Strategic Highway Research Program desarrolló nuevos ensayos para medir las propiedades de los cementos asfálticos, la investigación contiene una serie de ensayos que mide las propiedades físicas que están directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con su comportamiento en servicio (McGennis et al., 1998).

La constante investigación internacional, la experiencia sobre nuevos métodos de análisis, las especificaciones para evaluar la calidad de los cementos asfálticos y la obtención de una caracterización reológica actualizada, han permitido desarrollar



principalmente los criterios de la clasificación denominada Grado de Rendimiento (PG), la cual, consiste en la realización de mediciones reológicas dinámicas que establecen una clasificación del cemento asfáltico, la cual, se determina por dos temperaturas, la temperatura máxima y mínima de desempeño, las cuales indican el intervalo de temperaturas en el que un cemento asfáltico se puede desempeñar satisfactoriamente, (Pinargote et al., 2019).

Otro aspecto importante en este sistema de clasificación es que las propiedades físicas son medidas sobre cementos asfálticos que han sido envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones de envejecimiento en un pavimento real a corto plazo, que representa la etapa de transporte, almacenamiento, manipulación, mezclado y construcción. A largo plazo se simula el envejecimiento del cemento asfáltico que tiene lugar durante su periodo de servicio (McGennis et al., 1998).

1.1 Objetivo general

Caracterizar reológicamente un cemento asfáltico convencional y tres modificados mediante la metodología Superpave, para determinar su Grado de Rendimiento (PG) para conocer el intervalo de temperaturas en las cuales tendrán un buen rendimiento.

1.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general se enuncian a continuación los objetivos específicos de esta investigación.

- Envejecimiento del cemento asfáltico convencional y los modificados mediante el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) y mediante la Vasija a Presión (PAV).
- Determinación de las curvas de viscosidad de los cementos asfálticos en estudio en condición original.
- Obtención del grado de rendimiento PG superior en el equipo DSR e inferior en la prueba BBR.



II ANTECEDENTES

2.1 Cementos asfálticos

El cemento asfáltico es un material denso utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, proveniente de los residuos de la destilación del petróleo crudo. (Sanz, 1999). Es de color marrón oscuro a negro, en el que sus componentes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo (Asphalt Institute, 1993).

Puede provenir de fuentes naturales, como depósitos en lagos, rocas y arenas asfálticas, o de los derivados de la destilación del petróleo crudo en refinerías, en forma natural o industrial, en el que son bombeados, transportados y almacenados en amplios tanques e impuestos a elevadas temperaturas donde los materiales más volátiles serán desalojados, y el residuo debidamente tratado será empleado como cemento asfáltico. (Pinargote et al., 2019).

El cemento asfáltico posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y lo vuelven idóneo para la industria de las vías terrestres, por su comportamiento visco-elástico que permite aprovecharlo de mejor manera.

Está compuesto de un sin número de moléculas complejas de las cuales la que presenta un mayor porcentaje es el carbono, seguido del hidrógeno, el oxígeno y sulfuros, y en pequeñas cantidades el nitrógeno y otros metales. La estructura molecular del cemento asfáltico de acuerdo al modelo micelar (Fig. 1) se divide en dos partes: los asfáltenos y los máltenos. Estos últimos a su vez se subdividen en resinas y aceites.

Los asfáltenos son partículas asfálticas sólidas de alta viscosidad que son las encargadas de dar elasticidad, resistencia y adhesión. Las resinas son semisólidas o sólidas en temperatura ambiente, fluyen cuando están a temperaturas altas y se vuelven frágiles cuando se encuentran ante temperaturas bajas, son las que proveen de ductilidad. Los aceites son líquidos incoloros, son solubles en la mayoría de los solventes y aumentan su fluidez (Vila Romaní, 2018).

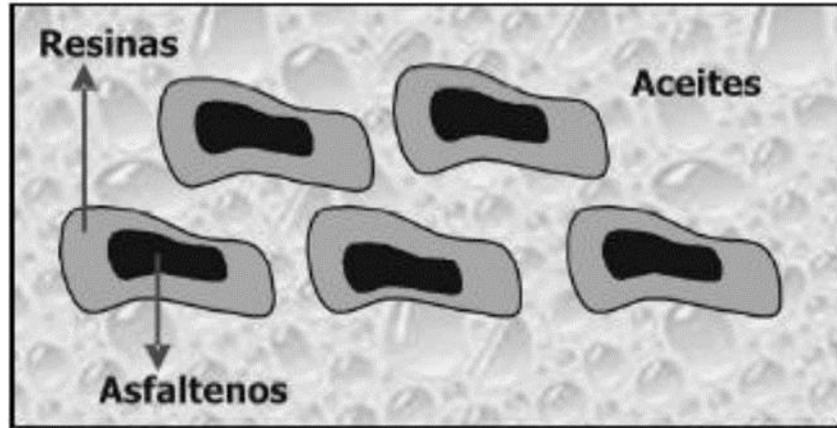


Fig. 1 Esquema coloidal de Pfeiffer (Anderson, 2016).

Uno de sus principales usos es la pavimentación de caminos en conjunto con los agregados pétreos. Sus características le permiten una buena unión y cohesión en altas temperaturas con el agregado pétreo. Este cementante contiene tres importantes propiedades químicas: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas, la segunda se define como la composición química, donde las impurezas de este son prácticamente inertes y la tercera precisa la seguridad de manejar el cemento asfáltico a altas temperaturas debido a su composición química, que le hacen tener características aglutinantes, esto debido a su composición de asfaltenos y máltenos que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades (Fig. 2). La temperatura influye de manera directa en el comportamiento de los cementos asfálticos, ya que modifican su estructura y con ello su desempeño (Asphalt institute, 1993).

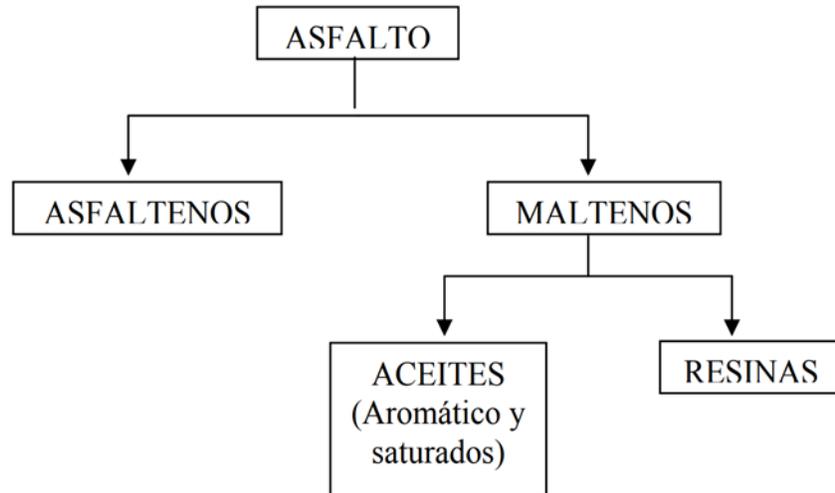


Fig. 2 Conformación del cemento asfáltico (Asfáltica revista técnica N. 8, enero 2007).

Los cementos asfálticos se pueden clasificar como convencionales o modificados; Los cementos asfálticos denominados convencionales, de acuerdo con la norma AASHTO-M20, se clasificaban en cinco grados estándares de consistencia obtenidos de la prueba de penetración: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, donde los números indicaban el valor de penetración permitido por grado que van de un rango de mayor a menor en el orden aquí presentado.

Actualmente la prueba de penetración se ha vuelto un método empírico extemporáneo, dejado atrás por el gran avance de la tecnología. En su lugar, la prueba de viscosidad se ha vuelto fundamental para la clasificación de los cementos asfálticos, misma que los ha clasificado de acuerdo a su viscosidad, la cual se mide en poises (P).

Por otro lado, los cementos asfálticos modificados surgen de la inquietud de proveer mejoras a los cementos asfálticos existentes en sus propiedades físicas con el fin de desarrollar una gama más amplia de productos, tal que su aplicación sea más eficaz bajo diferentes condiciones desfavorables de servicio.

La mayor ventaja del cemento asfáltico modificado con polímeros (PMA) es el rendimiento y la durabilidad significativamente mejorados debido a la incorporación de polímeros. Específicamente, un polímero podría reducir el costo de



mantenimiento del pavimento y prolongar la vida útil (Polacco et al., 2005; Polacco et al., 2006).

En general, los polímeros se clasifican en tres categorías: elastómeros termoplásticos, plastómeros y polímeros reactivos. El modificador de polímero más famoso fue el copolímero en bloque de estireno-butadieno-estireno (SBS), que era un elastómero termoplástico (Polacco et al., 2004). Los elastómeros resistieron la deformación permanente al estirarse y recuperar su forma inicial, mientras que el cemento asfáltico modificado con plastómeros tiende a resistir la deformación al formar una red tridimensional resistente y rígida (Ameri et al., 2012).

2.1.1 Comportamiento del cemento asfáltico en función de su temperatura

La forma en cómo se comporta un cemento asfáltico se basa principalmente en su propiedad visco-elástica, es decir, su desempeño estará sometido tanto en función de la carga como a la temperatura que se encuentre. Además, tal desempeño también dependerá de su envejecimiento. Las temperaturas altas en un periodo corto de tiempo causarán la misma conducta que si se encontrara expuesto a una menor temperatura, pero a mayor tiempo, Fig. 3 (Castillo, 2003).

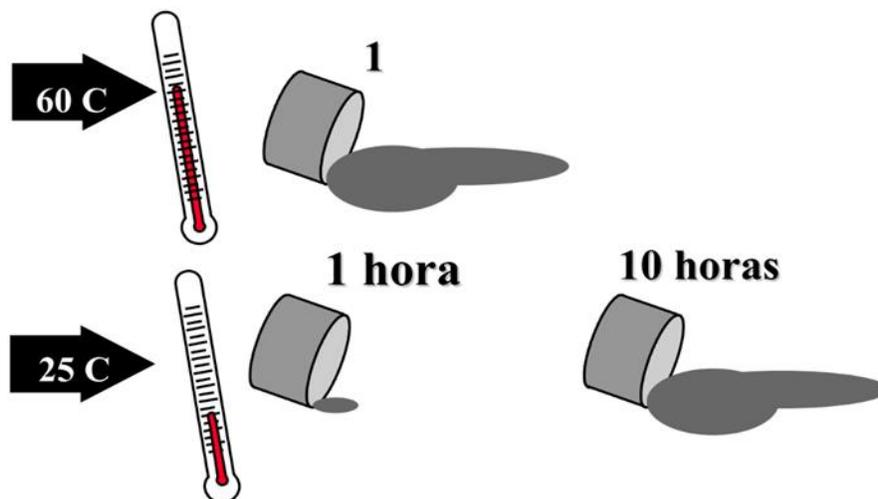


Fig. 3 Conducta del flujo del cemento asfáltico (Castillo, 2003).



Cuando el cemento asfáltico es sometido a temperaturas altas durante su periodo de servicio, se puede comportar como un líquido viscoso, por esto mismo se le considera como un fluido Newtoniano, puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa, (Cárdenas et al., 2009). Esta característica de ser un líquido viscoso se le puede llamar también “plástico” debido a que al momento que comienzan a fluir tienden a deformarse y ya no le es posible volver a su estado inicial, esto provoca que el cemento asfáltico pierda su adherencia con el agregado pétreo generando desprendimientos, (McGennis et al., 1998).

Por otro lado, al estar expuesto a temperaturas bajas el cemento asfáltico puede fracturarse o agrietarse, debido a que tiende a comportarse como un sólido elástico, contrario a lo que sucede con las altas temperaturas. Para comprender esto de mejor manera, se debe decir que las tensiones internas que sufre el cemento asfáltico se acumulan en el pavimento en el momento en el que este intenta contraerse, al mismo tiempo que es detenido por la subcapa de la estructura del camino, por lo que se forman hendiduras transversales en la superficie de la misma debido al cambio de temperatura: es por esta razón que la mezcla puede presentar un comportamiento frágil.

Ahora bien, teniendo un punto intermedio a una temperatura ambiente, el cemento asfáltico se comporta como un sólido visco elástico, lo que permite que tenga una buena adherencia con el agregado, aprovechando así ambas características. Por un lado, volviéndose fluido al ser calentado, y por otro su función cementante al volverse sólido una vez que se enfría.

Lo expuesto anteriormente tiene relación directa con el Grado de Rendimiento PG), el sistema Superpave PG consta de dos límites de temperatura, por ejemplo, PG 70-22, en los que la temperatura superior (70° C) y la temperatura inferior (-22° C) están determinadas por la temperatura máxima promedio de siete días (°C) y la temperatura mínima de diseño del pavimento (°C), respectivamente. El sistema Superpave PG hizo el primer intento de relacionar directamente las propiedades físicas medidas de los cementos asfálticos con el rendimiento de campo de los



pavimentos asfálticos teniendo debidamente en cuenta el envejecimiento y las condiciones del pavimento. Se diseñaron nuevas pruebas y especificaciones para abordar los requisitos de rendimiento, incluida la resistencia a la formación de roderas, la resistencia al agrietamiento por fatiga y la resistencia al agrietamiento térmico (AASHTO T 315, ASTM D7175, AASHTO T 313, ASTM D6648, AASHTO T 314, ASTM D6723, AASHTO R 28, ASTM D6521, AASHTO T 240, ASTM D2872). Muchos investigadores han demostrado que el uso del sistema Superpave PG puede caracterizar los cementos asfálticos de manera más precisa y completa.

2.2 Envejecimiento en cementos asfálticos

El deterioro prematuro y la disminución considerable de vida útil en su periodo de servicio de los cementos asfálticos utilizados para pavimentación, están directamente relacionados con los procesos de envejecimiento (Rebelo et al., 2014).

Dicho lo anterior, de acuerdo con Bahia (1994), el cemento asfáltico está constituido por moléculas orgánicas las cuales al entrar en contacto con el oxígeno del medio ambiente reaccionan y forman un proceso denominado envejecimiento. El envejecimiento del cemento asfáltico consiste en el cambio de su estructura molecular, creando moléculas polares de mayor tamaño (Bahia et al., 1994), debido a esto el cemento asfáltico puede presentar mayor rigidez, aumento en su consistencia viscosa y una menor eficiencia en su desempeño, dando como resultado un endurecimiento por envejecimiento, Fig. 4.

Este fenómeno ocurre a una velocidad relativamente baja en su tiempo de servicio, aunque es más rápido en climas cálidos que en lugares fríos, debido a las altas temperaturas a las que se va a encontrar día con día, en contraste con temperaturas más bajas de un clima frío.

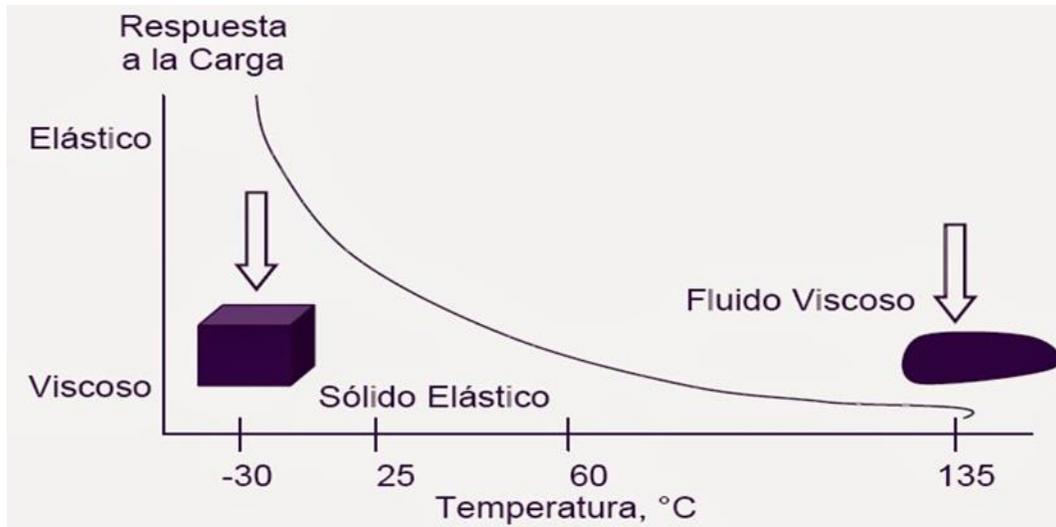


Fig. 4 Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico (Castillo, 2003).

El envejecimiento se puede llegar a originar desde las primeras etapas de elaboración, denominado envejecimiento a corto plazo, durante el mezclado en planta y el proceso de construcción, debido a factores como presión, temperatura y el tiempo, (Fernández et al., 2013). En los antecedentes de los ensayos Superpave se explica que, una considerable parte del envejecimiento por oxidación se efectúa antes de la aplicación del cemento asfáltico, siendo más específicos en el mezclado en caliente y en otras operaciones que se llevan a cabo para su preparación, (McGennis et al., 1998).

El envejecimiento a largo plazo se produce durante la vida útil del pavimento y es causado por la carga del tránsito, la distribución de vacíos de aire en la mezcla y varios factores presentes en el medio ambiente, como la radiación ultravioleta, el oxígeno, la temperatura y la humedad (Xu et al., 2019). Durante el proceso de envejecimiento ocurren diferentes reacciones físicas y químicas que dependen principalmente de tres mecanismos; volatilización, oxidación y endurecimiento estérico (Yener et al., 2014).

Los mecanismos de envejecimiento pudieran resumirse en (Anderson et al., 2012; Fernández et al., 2014; Xiangdao et al., 2020):



- 1) Pérdida de volátiles: El cemento asfáltico se rigidiza al perder volátiles y lo hacen mediante la exposición a la atmósfera y a altas temperaturas.
- 2) Formación de sulfóxidos: se presenta durante el mezclado en planta a altas temperaturas, haciendo que el cemento asfáltico aumente su rigidez.
- 3) Oxidación: Se produce una oxidación de la constitución de las moléculas del cemento asfáltico, lo cual produce el incremento en la polaridad de la mezcla y, por ende, una reducción en la parte de los aromáticos originada por la separación de los anillos en el proceso de la oxidación. El cemento asfáltico al estar propenso a endurecerse, este va de la mano por una subida de los conjuntos de los asfáltenos.
- 4) Acción de rayos ultravioletas: rompe los lazos químicos del cemento asfáltico.
- 5) Acción de microorganismo: digieren los compuestos.
- 6) Acción del agua: rompe mecánicamente la estructura química del cemento asfáltico.
- 7) El endurecimiento estérico: representa una reorganización estructural de las moléculas debido a los cambios de temperatura, lo que provoca un aumento de su viscosidad y ligeras contracciones de volumen.

En laboratorio es posible simular el envejecimiento a corto y largo plazo de un cemento asfáltico, mediante las pruebas de Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) que simula el envejecimiento en el proceso mezclado y compactación del mismo. Por otro lado, la de Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), simula el envejecimiento del cemento asfáltico durante su vida en servicio.

Como alternativa a la reducción de los efectos de envejecimiento en el cemento asfáltico se ha implementado el uso de modificadores, con la adición de estos polímeros al cemento asfáltico se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general las propiedades que se mejoran son: la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, a la deformación, la fatiga, el envejecimiento, y disminuir la



susceptibilidad térmica. Esta tecnología es también frecuente cuando se requiere que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o aplicaciones especializadas en las cuales los cementos asfálticos modificados permiten espesores más delgados de capas asfálticas de lo que normalmente se requiere (Casey et al., 2008).

2.2.1 Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)

El envejecimiento está ligado principalmente a la pérdida de elementos volátiles y la oxidación de un cemento asfáltico, esto ocurre durante la fabricación de la mezcla asfáltica, produciendo un incremento en la viscosidad y un endurecimiento del cemento asfáltico (Airey, 2003).

Debido a su composición química y a la necesidad de estudiar su envejecimiento, la prueba de RTFO fue propuesta por Hveem et al. (1963), el cual fue desarrollada en la División de Carreteras de California para evaluar el envejecimiento del cemento asfáltico a corto plazo, (Fig. 5). Dicho procedimiento está regido, bajo la norma ASTM D2872 “Standart Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)”.



Fig. 5 Equipo de Horno Rotatorio de Película Delgada.

La prueba consiste en la rotación de 8 vasos de vidrio, los cuales en su interior contienen 35 ± 0.5 gr de cemento asfáltico, su duración es de 85 minutos a una temperatura de 163 ± 0.5 °C. El interior del horno cuenta con un carrusel donde se colocan los 8 vasos y gira a una velocidad de 15 revoluciones/minuto. Además, se debe controlar la presión de aire a 4000 ml/min.

La prueba simula el envejecimiento a corto plazo que puede presentar durante su almacenamiento, mezclado, transporte, tendido y compactación in situ del cemento asfáltico. Este procedimiento asegura que todo el cemento asfáltico que se encuentre expuesto al calor, presión de aire y movimiento giratorio durante la prueba, no se mantendrá en un solo lugar estancado, y evitará la formación de una capa protectora, que impida que el envejecimiento no sea homogéneo en toda la muestra, es decir, que tenga la misma condición.

Además, el ensayo permite determinar el cambio de masa que ocurre durante la prueba, debido a la pérdida de volátiles que sufre, en algunas ocasiones no presenta pérdida, si no por el contrario, gana masa debido a la absorción de oxígeno, (Cusi et al., 2021). El cambio de masa y las propiedades que se miden en el residuo del



material proveniente del RTFO se utilizan para clasificar los cementos asfálticos de acuerdo con la norma AASHTO M 320. La ecuación 1 muestra la forma para determinar la pérdida de masa o volátiles durante la prueba RTFO:

$$W_c = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde

W_c es la pérdida de masa por calentamiento en la muestra de prueba (%), W_i representa la masa inicial de la muestra de prueba (gr) y W_f es la masa final de la muestra (gr).

La naturaleza del ensayo no es exacta a las que se puede encontrar en la práctica, pero se ha demostrado que la cantidad de endurecimiento en el RTFO se correlaciona razonablemente con la observada en una mezcladora convencional (Whiteoak, 1990). Posteriormente, el residuo de cemento asfáltico RTFO es utilizado para ensayos como el DSR, para evaluar los cambios generados en su estructura por el envejecimiento a corto plazo y el ensayo PAV, que simula el envejecimiento a largo plazo.

2.2.2 Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)

El ensayo de Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), Fig. 6, se enfoca en utilizar la temperatura y la presión, para hacer una simulación en el envejecimiento que sufrirá el cemento asfáltico en un periodo de 20 horas, de acuerdo a la norma ASTM D6521-13 “Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)”, en comparación con su periodo de servicio una vez colocado en obra, el cual será de aproximadamente 7-10 años en promedio, (Franco et al., 2019).



Los efectos del envejecimiento del asfalto a largo plazo por servicio no se habían incorporado en especificaciones para cementos asfálticos previo a las especificaciones Superpave (Garnica et al., 2003).

El PAV, fue usado por muchos años en investigaciones en cementos asfálticos, fue modificado por el SHRP y un nuevo procedimiento se desarrolló para simular el envejecimiento en servicio. El PAV expone al cemento asfáltico a presiones y altas temperaturas para reproducir el efecto del envejecimiento a largo plazo.

La especificación Superpave recomienda el uso de estos dos métodos de envejecimiento para determinar los parámetros de deformación y fatiga (RTFO Y PAV).



Fig. 6 Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV).

El ensayo PAV se realiza con el residuo de envejecimiento de RTFO. Se requieren 50 gr del material recuperado por cada bandeja de prueba (10 bandejas), la prueba se ejecuta a una temperatura entre 90 a 110 °C (dependiendo de las condiciones climáticas) (Anderson et al., 1994). El horno para acondicionar el cemento asfáltico



es de acero inoxidable, cuenta con un control de temperatura y presión; con dimensiones interiores adecuadas para contener las bandejas y su soporte. El soporte, será capaz de sostenerlas en una posición horizontal y bien niveladas, de modo que el espesor de la película de cemento asfáltico sea razonablemente uniforme. El soporte está diseñado para su fácil inserción y extracción desde el interior de la vasija de presión (Transportes, 2022). La presión a la que se debe encontrar el material dentro del equipo PAV deberá ser de 2.1 MPa, por un lapso de tiempo de 20 horas \pm 10 minutos.

La alta presión aplicada durante este acondicionamiento está destinada a mejorar la difusión de aire en el cemento asfáltico con un enfoque en el oxígeno como componente reactivo de interés (Transportes, 2022). Al terminar, el residuo de material se coloca en unas cápsulas para poder transportarlo al horno de vacío y someterlo a una desgasificación, la cual permitirá liberar todas las burbujas de aire que pudieron haberse formado durante la prueba PAV.

El proceso de desgasificación se lleva a cabo durante 30 minutos a una presión de 30 ± 2.5 kPa y a una temperatura de 175 °C, finalmente se recupera y se homogeneiza el material para poder realizarle su caracterización y obtener su grado de rendimiento (PG) en condición PAV.

2.3 Métodos para determinar las propiedades de forma empírica y reológica de los cementos asfálticos

El cemento asfáltico a través del tiempo, ha sido evaluado mediante algunos ensayos empíricos como: penetración y viscosidad, los cuales se desarrollaron a través del tiempo, usando la experiencia con pavimentos asfálticos, es por ello que se les denomina métodos empíricos (Minaya et al., 2003).

Estos ensayos se desarrollaron durante una época en la que el tránsito era mucho menor al actual, y las cargas que se aplicaban eran significativamente inferiores. El peso de los camiones se limitaba a 72,000 lb y presión de neumático a 75 psi. En la actualidad los camiones superan las 80,000 lb y las presiones de llanta son de 125



psi, esto representó un aumento del 10% en el peso de los camiones y un 40% de incremento en los esfuerzos aplicados al pavimento asfáltico (Minaya et al., 2003). La Fig. 7, muestra uno de los mayores problemas de clasificar el cemento asfáltico por penetración, como se observa se pueden tener tres tipos de cemento asfáltico de diferentes fuentes con la misma clasificación por penetración (25° C), pero con diferentes propiedades a temperaturas diferentes (Minaya et al., 2006).

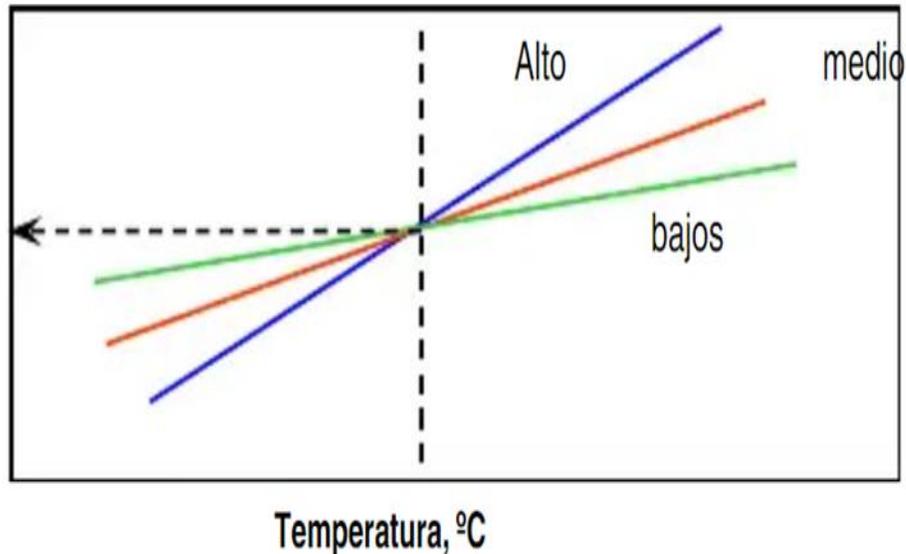


Fig. 7 Comportamiento de diferentes cementos asfálticos, clasificados con el mismo grado de penetración (Minaya et al., 2006).

Ante esta situación el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP) presentó una serie de ensayos en 1987 para una mejor caracterización del cemento asfáltico a partir de la metodología Superpave (McGennis et al., 1998). La principal característica de esta metodología es su funcionalidad tanto en cementos asfálticos modificados como para convencionales (sin modificar).

El sistema Superpave es un programa mejorado de especificaciones para materiales, diseño, análisis y predicción del comportamiento de pavimentos. El sistema incluye equipos de ensayo, procedimientos y criterios como los mostrados en la Tabla 1 (McGennis et al., 1998):

**Tabla 1. Ensayos de Metodología Superpave**

Equipo	Propósito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas e intermedias
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las temperaturas del cemento asfáltico a altas temperaturas
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las temperaturas del cemento asfáltico a bajas temperaturas
Reómetro de viga a flexión (BBR)	

Dentro de esta metodología de diseño se incluyen especificaciones para seleccionar el cemento asfáltico de acuerdo con propiedades de desempeño, no solo con propiedades físicas o químicas, también con el entorno en donde se desempeñará, el tiempo que será utilizado, su elaboración y su calidad. Mediante los ensayos que anteriormente fueron explicados (Bahia et al., 2001; Daly et al., 2010).

2.4 Reología en cementos asfálticos

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales, en cualquiera de sus formas, en términos de elasticidad y viscosidad, en función de tiempo, temperatura, fuerzas externas, humedad y presión, como se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8 Reología en los materiales (Castillo 2003).

Al referirnos a un cemento asfáltico, la viscosidad influye de manera directa en la reología del mismo (Castillo, 2003). Se puede definir como viscosidad a la resistencia que tienen las moléculas que conforman el fluido correspondiente a las deformaciones graduales, producidas por fuerzas cortantes. Cuando se encuentran en presencia de bajas temperaturas y/o bajos tiempos de carga, por ejemplo, camiones a alta velocidad, se comportará como un sólido elástico, (Pinargote et al., 2019).

El cemento asfáltico es un material visco-elástico y por ende un material con un comportamiento complejo que depende de las condiciones a las cuales esté expuesto. Dependiendo de dichas condiciones se puede comportar como un cuasi sólido o un cuasi líquido, pero en general tiene un comportamiento intermedio entre ambas condiciones límites (componente elástica y viscosa). Típicamente, un cemento asfáltico convencional presenta un comportamiento de fluido newtoniano, mientras que uno modificado se comporta como un fluido plástico (Aguiar et al., 2017).

La principal característica reológica de los cementos asfálticos, se refiere a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo. Con los residuos obtenidos de los ensayos de envejecimiento de RTFO y PAV, y teniendo en cuenta los cambios que han sufrido con respecto a los cementos asfálticos originales, se



determinan las propiedades reológicas de cada uno de los cementos asfálticos envejecidos (Lizcano, 2003).

La reología tiene su aplicación cuando los cementos asfálticos sufren deformación plástica, en vez de deformarse elásticamente, una vez que están sometidos a algún tipo de carga externa, por ejemplo, en su vida de servicio, en donde las cargas producidas por los automóviles lo deforman. (Aguiar et al., 2017)

En la Fig. 9, se muestran los equipos utilizados en la caracterización reológica del cemento asfáltico según la metodología de diseño Superpave.



Fig. 9 Ensayos Superpave para Caracterización reológica de Asfaltos (Aguiar et al., 2017).

Estos ensayos están enfocados en el comportamiento reológico del cemento asfáltico, y este dependerá de la temperatura y del tiempo de carga. Dependiendo de la temperatura se puede comportar como un sólido o un líquido, pero en general tiene un comportamiento intermedio entre ambas condiciones límites (componente elástica y viscosa), (Aguiar et al., (2007). Ante altas temperaturas y los tiempos de carga, es decir con camiones a baja velocidad, el cemento asfáltico actuará como un líquido viscoso y fluirá (Fig. 10). Y a bajas temperaturas o bajo cargas rápidas, el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico.



Fig. 10 Cemento asfáltico en su estado líquido viscoso, (Aguiar et al., 2007).

Así mismo, las propiedades reológicas del cemento asfáltico dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes químicos, como sus asfaltenos o máltenos, los cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos del petróleo (Hoiberg, 1965).

2.4.1 Determinación del Grado de Rendimiento (PG)

El grado de rendimiento PG (Grade Performance) es el rango de temperaturas máxima y mínima entre las que un cemento asfáltico convencional o modificado se desempeña de manera satisfactoria (SICT, 2018). La clasificación por grado de desempeño forma parte del sistema Superpave.

Esta metodología proporciona ensayos capaces de correlacionar las propiedades físicas experimentadas en campo con laboratorio, e incluye una nomenclatura para clasificar el grado de los cementos asfálticos, el cual se designa como PG XX – YY (Morales, 2013), en donde PG: *performance grade* o grado de rendimiento; XX: temperatura máxima de diseño para el pavimento en grados centígrados (°C); YY: temperatura mínima de diseño para el pavimento en grados centígrados (°C), (Alonso et al., 2021).

Las designaciones de estos grados están referidas a las temperaturas máximas del pavimento en un promedio de siete días y la temperatura mínima de diseño será el valor del día más frío en el registro histórico de acuerdo a lo que indica la norma



ASTM D946 "Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction" (Zahra et al., 2018; Safwan et al., 2014). Tomando como ejemplo un cemento asfáltico PG 64 – 28 es adecuado para un ambiente donde la temperatura máxima en el pavimento no supere los 64°C, y la mínima no descenderá más de -28°C (Huang, 2004).

Una consideración importante acerca del grado de rendimiento PG es conocer las temperaturas tanto máximas como mínimas que pueden ser elegidas, para dicha clasificación, el grado PG va en incrementos de grado cada 6° C tanto para las temperaturas altas como para las temperaturas bajas como se observa en la Fig. 11. Se puede tener un grado PG en las temperaturas altas desde 46 hasta 82° C y del mismo modo para las temperaturas bajas desde un -10 hasta un -46° C.

La clasificación del grado PG muestra una particularidad con la relación que existe entre las temperaturas altas y bajas, que señala que se puede tener prácticamente cualquier combinación que se desee, tanto en temperaturas altas como bajas; tomando como ejemplo la Fig. 11 se puede tener prácticamente cualquier combinación que se desee, no obstante, para tener un PG 82-46 ya no es un material muy común para ser utilizado, debido a que es un producto que se va a utilizar a temperaturas muy altas (82° C) y en invierno tan bajas como -46° C, lo cual lo convierte en una situación no tan factible.

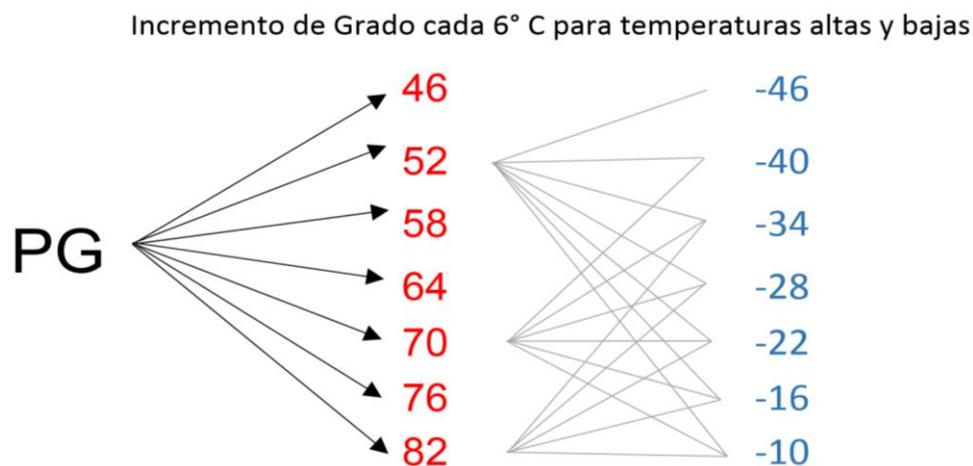


Fig. 11 Combinaciones posibles del Grado PG.



Se debe tener en consideración que no solo se establecen los valores máximos y mínimos de temperaturas que resisten las deformaciones o los agrietamientos por temperatura respectivamente, sino que también se deben analizar las temperaturas medias relacionadas con la resistencia a la fatiga las cuales se pueden calcular a través de la ecuación 2 (Delgadillo et al., 2017).

$$T_{int} = \frac{XX-YY}{2} + 4 \quad Ecu. 2$$

En donde, T_{int} es la temperatura intermedia, XX es la temperatura superior y por último YY es la temperatura inferior.

Para la obtención del grado PG se realizan dos ensayos principales para caracterizar el cemento asfáltico de acuerdo a la metodología Superpave, las cuales se basan en propiedades ingenieriles que controlan los tres tipos de deterioro que suelen presentarse en pavimentos asfálticos: roderas (deformaciones), fatiga y agrietamiento (Rubio, 2018). El sistema de clasificación analiza al cemento asfáltico en las tres etapas características a las que será expuesto, y posteriormente utilizado a las pruebas reológicas (Pinargote et al., 2019):

- 1) Cemento asfáltico en estado original: Previo a cualquier proceso de mezclado.
- 2) Cemento asfáltico envejecido en RTFO: Simula la exposición que sufre el cemento asfáltico durante los procesos de mezclado, transporte y puesta en obra de la mezcla.
- 3) Cemento asfáltico envejecido en PAV: Envejecimiento durante un largo período de tiempo en servicio. La muestra a ensayar en PAV proviene del residuo de RTFO.

Las clasificaciones o formas a estudiarse comprenden:

- 1) Clasificación a altas temperaturas utilizando el parámetro $G^*/\sin(\delta)$ obtenido con el equipo DSR en muestras con el envejecimiento a corto plazo (RTFO).



- 2) Control a temperaturas intermedias utilizando el parámetro $G^* \text{sen}(\delta)$ obtenido con el equipo DSR en muestras con el envejecimiento a largo plazo (PAV).
- 3) Clasificación a bajas temperaturas utilizando los resultados del Reómetro de Viga de Flexión (BBR) en muestra con envejecimiento a largo plazo (PAV).

En el DSR surge el concepto de G^* y δ , donde el registro de los valores son representados en gráficas de esfuerzo-deformación las cuales sirven para la determinación del grado PG superior.

La relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante provee de información necesaria para calcular G^* y δ . En la Fig. 12 se explica el cálculo de estos valores.

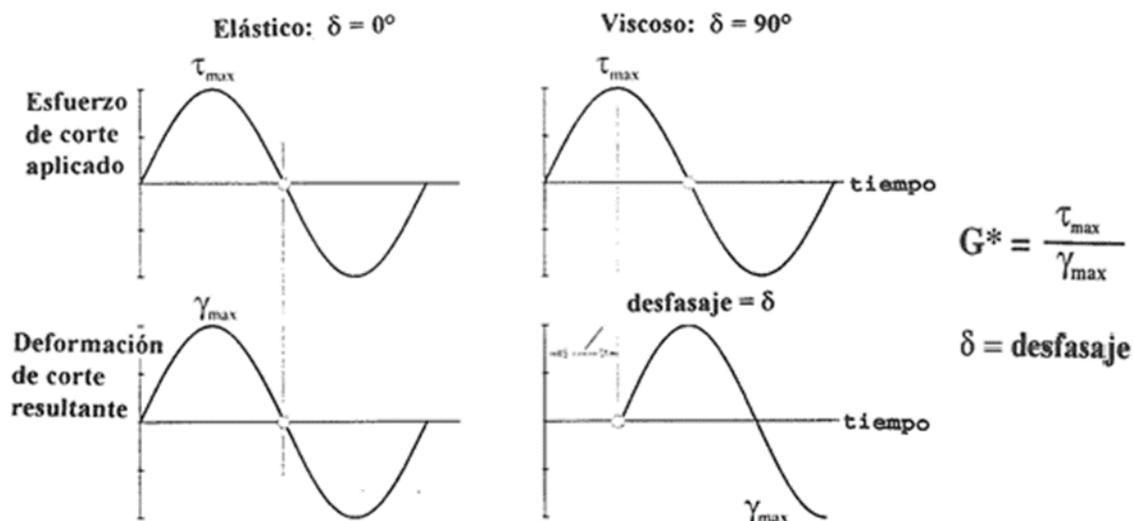


Fig. 12 Resultados de esfuerzo deformación (McGennis et al., 1998).

Las ecuaciones que el equipo DSR utiliza para calcular $\tau_{\text{máx}}$ y $\gamma_{\text{máx}}$ son:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad \text{Ecu. 3} \quad \text{y} \quad \gamma_{\text{máx}} = \theta r/h \quad \text{Ecu. 4}$$

En donde:

T = Máximo torque aplicado.



R = Radio de la geometría o muestra, 12.5 o 4 mm.

θ = Ángulo de deflexión (rotación).

H = Altura (espesor) de la muestra, 1 o 2 mm (también denominado GAP).

Es importante mencionar que el radio de la muestra es un factor relevante, por lo que el correcto enrasado de esta es importante para evitar una lectura de datos erróneos o alterados.

Por otra parte, en la prueba BBR se obtienen los valores inferiores del Grado PG, los cuales se relacionan con el agrietamiento térmico a bajas temperaturas, el cual depende de las condiciones climáticas adversas en terreno, sin embargo, el endurecimiento y su fragilidad aumenta con los años de servicio, el equipo de BBR realiza dos cálculos para determinar el grado PG inferior, el primer cálculo es para la rigidez a la fluencia del cemento asfáltico, con la ecuación 5. Para el segundo parámetro, el cual es el valor de m que representa el cambio de rigidez en función del tiempo, como se muestra en la Fig. 13.

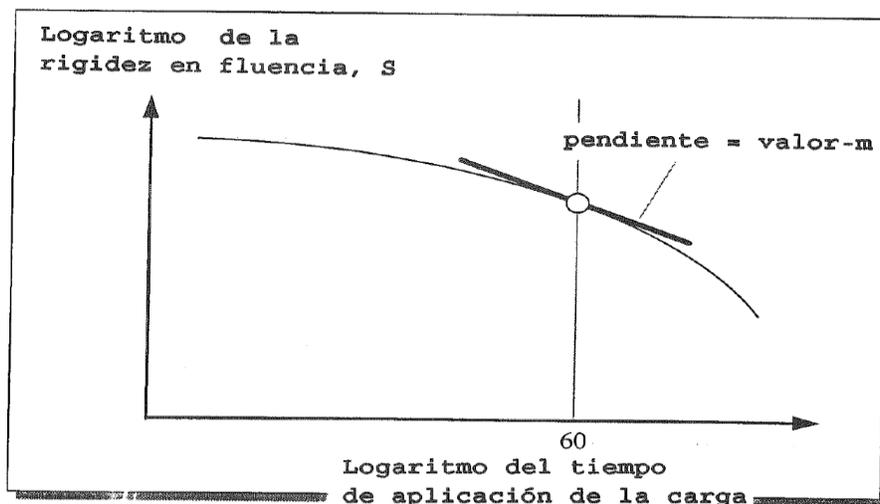


Fig. 13 Método para calcular el valor de m (McGennis et al., 1998).



CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

La Tabla 2 es correspondiente a la norma AASHTO M 320 de la clasificación por grado de rendimiento.

Tabla 2 Clasificación por grado de rendimiento.

Grado de desempeño	PG 58-				PG 64-					PG 70-					PG 76-				
	16	22	28	34	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Promedio 7-días T° máx. diseño	<58				<64					<70					<76				
Temp. Mínima de diseño	> - 16	> - 22	> - 28	> - 34	> - 10	> - 16	> - 22	> - 28	> - 34	> - 10	> - 16	> - 22	> - 28	> - 34	> - 10	> - 16	> - 22	> - 28	> - 34
ASFALTO ORIGINAL																			
Punto de inflamación	230																		
Viscosidad Máx. 3 Pa. S, Temp de ensayo °C	135																		
Reómetro de Corte Dinámico G*/send, mín. 1.00 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C Geometría de 25 mm	58				64					70					76				
RESIDUO RTFO																			
Perdida de masa, % máx.	1.00																		
Reómetro de Corte Dinámico G*/send, mín. 2.20 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C Geometría de 25 mm	58				64					70					76				
RESIDUO PAV																			
Temp. de envejecimiento PAV, °C	100				100					100					100				
Reómetro de Corte Dinámico G*send, máx 5000 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C Geometría de 8 mm	25	22	19	16	31	28	25	22	19	34	31	28	25	22	37	34	31	28	25
Rigidez a flexión @ 60s Rigidez "S", MPa	300 Máximo																		
Valor pendiente "m" mín. 0,300	0.300 Mínimo																		
Reómetro de Viga a Flexión Temperatura de ensayo, °C	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24



2.4.1.1 Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

El reómetro de corte dinámico es usado para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los cementos asfálticos, permite medir el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) de un cemento asfáltico. El parámetro G^* es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se somete al corte, este tiene dos componentes: una elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable). El parámetro δ es un indicador de las proporciones de las deformaciones recuperable y no recuperable (McGennis et al., 1998). Entre mayor sea δ , el material es más viscoso. Un material que experimenta un comportamiento totalmente elástico experimenta un $\delta=0^\circ$, mientras que uno puramente viscoso presenta $\delta=90^\circ$. G^* y δ son utilizados para predecir la resistencia a las deformaciones y al agrietamiento por fatiga (Castro et al., 2015). Dado que el DSR solo toma tres medidas; torque, rotación angular y tiempo, todos los resultados se calculan a partir de estas variables.

Los dos métodos más comunes que utiliza el DSR para determinar las propiedades viscoelásticas de los cementos asfálticos son los métodos transitorios (esfuerzo/deformación a tasa constante) y los dinámicos (oscilatorios) (Bitafal, 2020). La configuración típica de estos equipos consta de una placa inferior fija y una placa superior móvil (geometrías), entre las cuales se coloca una muestra de cemento asfáltico a la cual se aplica un esfuerzo de corte, estos pueden estar en tres condiciones: original, envejecimiento RTFO y PAV, en la Fig. 14 se muestra el equipo DSR.



Fig. 14 Equipo Reómetro de corte Dinámico (DSR).

Los ensayos dinámicos u oscilatorios cubren un amplio rango de esfuerzos en tiempos relativamente cortos. El funcionamiento del equipo puede ser por esfuerzo controlado o por deformación controlada. En una disposición de esfuerzo controlado, se aplica un par fijo a la placa superior para generar el movimiento oscilatorio. Debido a que el nivel de esfuerzo aplicado es fijo, la distancia que la placa se mueve en su trayectoria oscilatoria puede variar entre los ciclos (Bitafal, 2020).



Cuando se define el ensayo por deformación controlada, la placa superior se mueve con precisión entre las extremidades de amplitud a la frecuencia especificada y se mide el par necesario para mantener la oscilación.

Por tanto, el equipo DSR se utiliza para evaluar el comportamiento viscoelástico que experimenta el cemento asfáltico a intermedias y altas temperaturas de servicio. El procedimiento de ensayo puede ser consultado en AASHTO TP 5 93 "Standard Test method for determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Provisional Standard".

Los valores de G^* y δ en los cementos asfálticos dependen directamente de la temperatura y su frecuencia de carga. A altas temperaturas se comportan como fluidos viscosos. Por el contrario, a temperaturas muy bajas los cementos asfálticos se comportan como sólidos elásticos (Fig. 15).

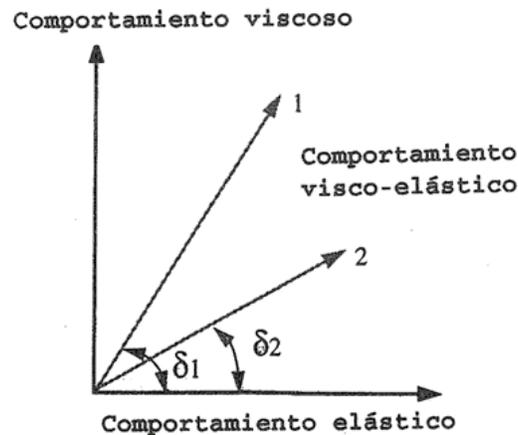


Fig. 15 Comportamiento elástico y viscoso, (McGennis et al., 1998).

En la Fig. 16, se presentan dos cementos asfálticos, se puede notar que ambos tienen características visco-elásticas, pero el cemento asfáltico de la Fig. 16b es más elástico, esto debido a su ángulo de fase (δ) más amplio, por el contrario, el cemento asfáltico de la Fig. 16a es más viscoso.

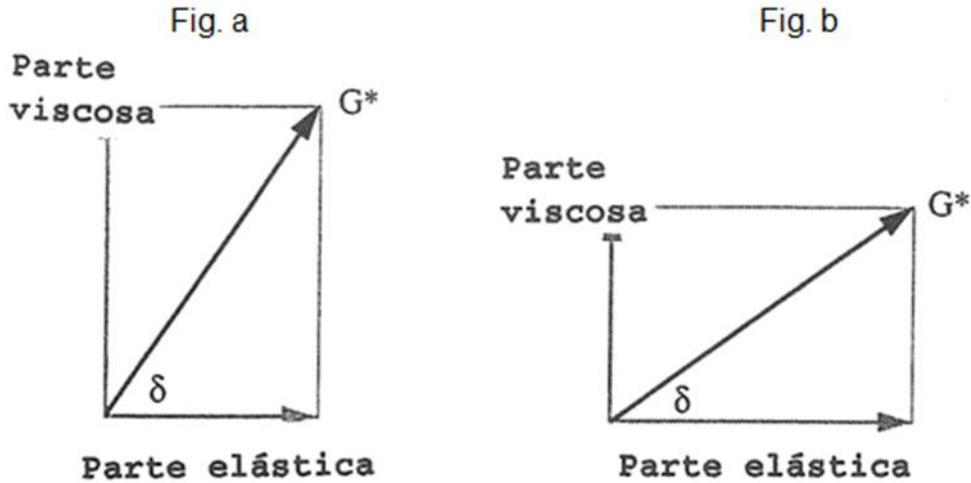


Fig. 16 Mediciones del DSR (McGennis et al., 1998).

2.4.1.2 Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR)

El Reómetro de Viga a Flexión mide la deflexión de los cementos asfálticos mediante el módulo de rigidez a flexión (s) bajo una carga constante a una temperatura que corresponde a las más bajas en las que se va a encontrar en su periodo de servicio, cuando el cemento asfáltico tiende a un comportamiento sólido - elástico (McGennis et al., 1998).

La prueba se ejecuta mediante la norma AASHTO T 313 “Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)”, cuyo objetivo es satisfacer los requisitos de agrietamiento térmico a baja temperatura del cemento asfáltico; el requerimiento máximo en la rigidez del cemento asfáltico es de $S=300$ MPa, mientras que el mínimo establecido para el valor de la pendiente $m=0.3$ (Bocanegra, 2019).

Los elementos principales en el equipo BBR (Fig. 17) son: el mecanismo de carga, el control de temperatura del baño, el sistema de control y de registro de resultados y la muestra a ensayar. El BBR utiliza un eje de punta roma, el cual aplica una carga en el centro de la viga, la cual se encuentra simplemente apoyada.

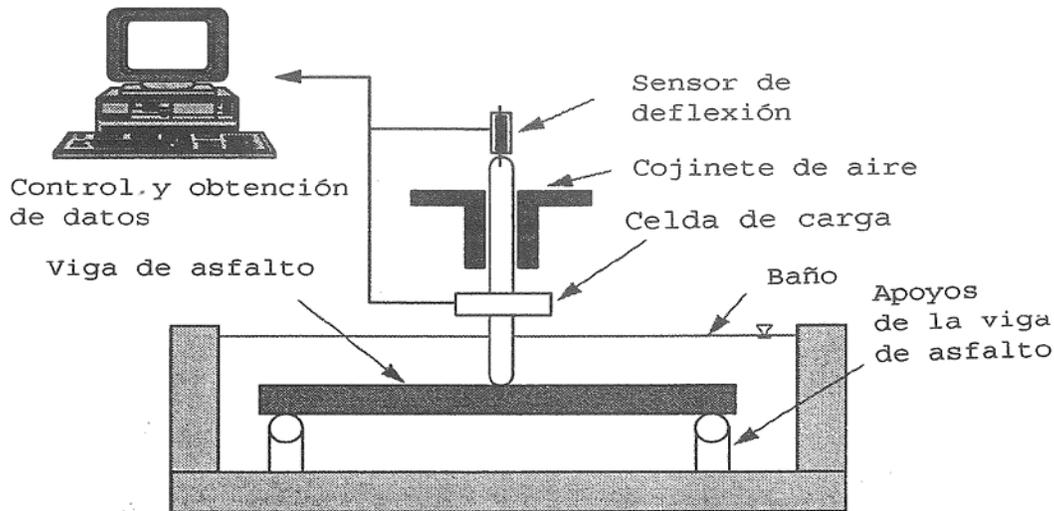


Fig. 17 Elementos que conforman el equipo BBR (McGennis et al., 1998).

El baño de temperatura contiene un fluido compuesto por glicol etileno, metanol y agua. Este fluido es circulado entre el baño del ensayo y un baño de circulación que controla su temperatura con una precisión de 0.1 °C. La circulación o cualquier otra agitación no debe perturbar la muestra y con ello influir en el proceso de este ensayo.

Para la preparación de la viga de ensayo se utiliza el cemento asfáltico residuo de PAV, vaciando el cemento asfáltico en el interior de un molde con forma prismática rectangular (Fig. 18), las piezas que lo componen son de aluminio y deberán estar lubricadas con vaselina y a estas piezas se debe colocar láminas de acetato. Para las piezas terminales se deben empastar con una mezcla de glicerina y talco mezclados para así lograr la consistencia pastosa. Esto se realiza con el fin de que al momento de hacer el desmolde la viga no se deforme por no desmoldarse correctamente.

Para la ambientación de la viga, ésta se somete a un periodo de enfriamiento entre 45 y 60 minutos, el exceso de cemento asfáltico de la superficie se elimina con una espátula caliente mediante el enrasado. La viga deberá permanecer en el molde a temperatura ambiente y sólo debe retirarse cuando el ensayo se encuentre listo



para comenzar, pero nunca deberá permanecer más de tres horas en el molde (McGennis et al., 1998).

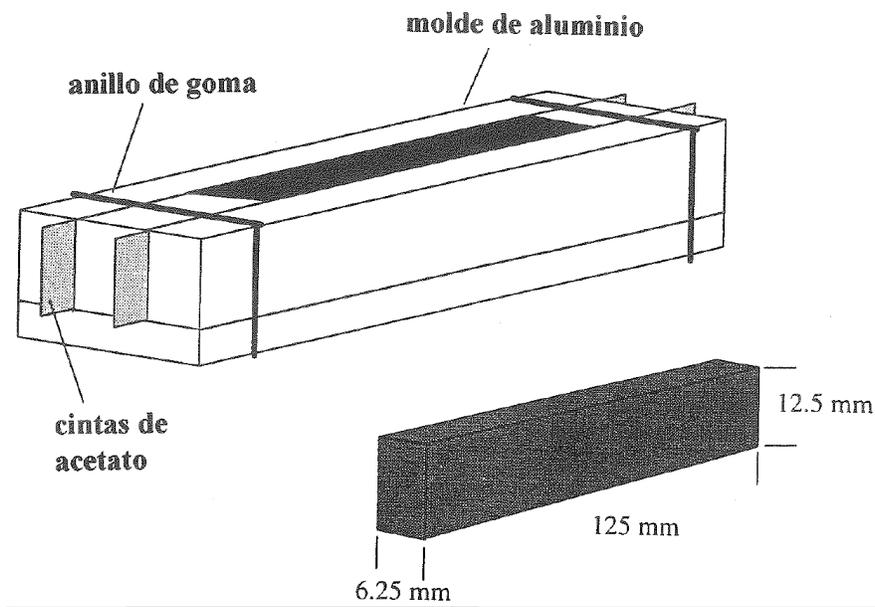


Fig. 18 Elementos que componen la creación de la viga de cemento asfáltico (McGennis et al., 1998).

Al momento de desmoldar la viga, se debe enfriar el molde con la muestra en un congelador durante 5 a 10 minutos, o bien, en un baño helado por 30 a 45 segundos a $-5 \pm 5^\circ \text{C}$.

Cuando se lleva a cabo la separación de las barras de aluminio y el acetato, las vigas de cemento asfáltico están listas para su acondicionamiento térmico, este requiere la inmersión en el baño a la temperatura de ensayo durante 60 ± 5 minutos. Al finalizar este periodo la viga ya se encuentra en condiciones para ser ensayada. Se debe tener cuidado en los tiempos del ensayo, debido a las tolerancias que se tienen, el operador deberá coordinar cuidadosamente la preparación del equipo y de la muestra (McGennis et al., 1998).

El ensayo consiste en someter una probeta en forma de viga a una carga constante de 980 mN durante un tiempo de 4 minutos, ya que es un ensayo de flexión de tres puntos y mide la deflexión en función del tiempo. La prueba se lleva a cabo a una



temperatura de 10° C por arriba de la temperatura baja del cemento asfáltico de acuerdo con las clasificaciones por grado de rendimiento. La Fig. 19 muestra en principio cómo trabaja el ensayo de la viga a flexión.

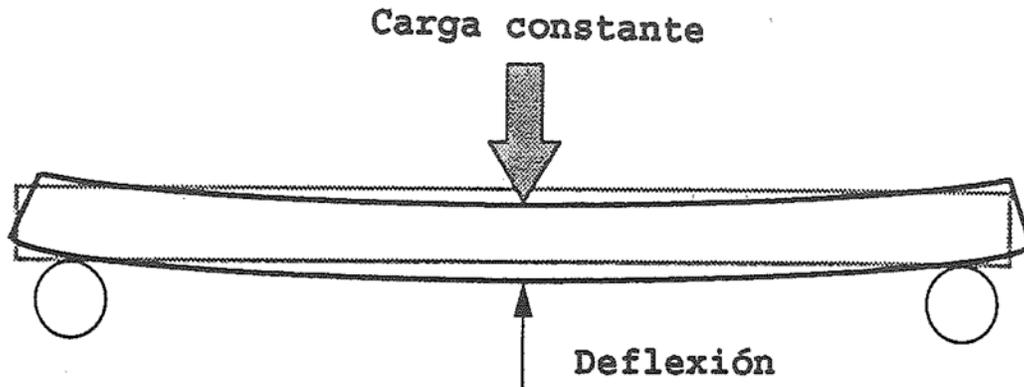


Fig. 19 Principio de la viga a flexión (McGennis et al., 1998).

Para la obtención de la rigidez a la fluencia del cemento asfáltico se emplea la teoría clásica de la resistencia de materiales. La fórmula para calcular la rigidez $S(t)$, se presenta en la ecuación 5.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad \text{Ecu. 5}$$

Donde:

$S(t)$ = Rigidez a la fluencia para $t = 60$ segundos.

P = Carga constante aplicada, 100 gr. (980 mN)

L = Distancia entre los apoyos de la viga, 102 mm

b = ancho de la viga, 12.5 mm; h = altura de viga, 6.5 mm

$\delta(t)$ = deflexión para $t = 60$ segundos

El segundo parámetro del ensayo de viga a flexión es el valor m , este valor representa el cambio de rigidez $S(t)$, en función del tiempo. En las especificaciones Superpave se indica que el valor (m) medido a 60 segundos sea mayor o igual a 0.300 m



2.4.2 Viscosímetro Rotacional (RV)

La viscosidad rotacional se utiliza para evaluar la manejabilidad del cemento asfáltico a altas temperaturas. Se realiza mediante un viscosímetro rotacional Brookfield (McGennis, 1998). Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 4402, "Viscosity Determination of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus". La viscosidad se mide a una temperatura alta, usualmente entre un rango de temperaturas con el fin de obtener las temperaturas que funcionen para generar la curva de viscosidad, por ejemplo, para un cemento asfáltico PG 64-22 se puede realizar entre 100° C a 180° C, para asegurar que el cemento asfáltico es lo suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezclado, es importante mencionar que el ensayo aplica para cementos asfálticos en condición original, es decir, sin envejecimiento.

La prueba de viscosidad rotacional permite establecer temperaturas de mezclado y compactación del cemento asfáltico con el agregado pétreo (mezcla asfáltica), mediante gráficas de viscosidad - temperatura (Bocanegra, 2019), con el fin de minimizar el efecto que puede causar la rigidez del cemento asfáltico sobre las propiedades volumétricas de la mezcla durante el proceso de fabricación en planta, independiente del tipo de cemento asfáltico, convencional o modificado, y de la gradación del agregado pétreo (Asphalt Institute, 1995).

Para preparar la muestra se calienta en un horno aproximadamente 30 gramos de cemento asfáltico, hasta lograr su fluidez suficiente para verterlo dentro de las probetas de ensayo, es importante que no supere los 150° C para evitar un envejecimiento prematuro. Mientras se calienta la muestra se debe agitar ocasionalmente para desalojar el aire atrapado y asegurar su homogeneidad. Se pesa el cemento asfáltico dentro de la cápsula, el volumen de material va a depender directamente del vástago utilizado, un mayor vástago implicará una menor cantidad de cemento asfáltico.

El viscosímetro rotacional Brookfield gira a las RPM especificadas en función del vástago utilizado y de la temperatura a la que se encuentre el cemento asfáltico, pero teniendo en consideración que su torque se debe encontrar dentro del 10 y 98



%, si supera o desciende dentro de este intervalo las mediciones de viscosidad no serán confiables.

Se registran los valores de torque necesarios para mantener constante la velocidad de rotación de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra de cemento asfáltico a la temperatura indicada. Para poder realizar el barrido de temperaturas se debe considerar que se requiere de un periodo de espera (normalmente 15 minutos) para que la temperatura de ensayo se estabilice, se recomienda comenzar con la temperatura más baja e ir aumentando gradualmente, debido a que es más fácil para la cámara termo recipiente calentar el cemento asfáltico que enfriarlo. En la Fig. 20 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el funcionamiento a grandes rasgos del Viscosímetro Rotacional.

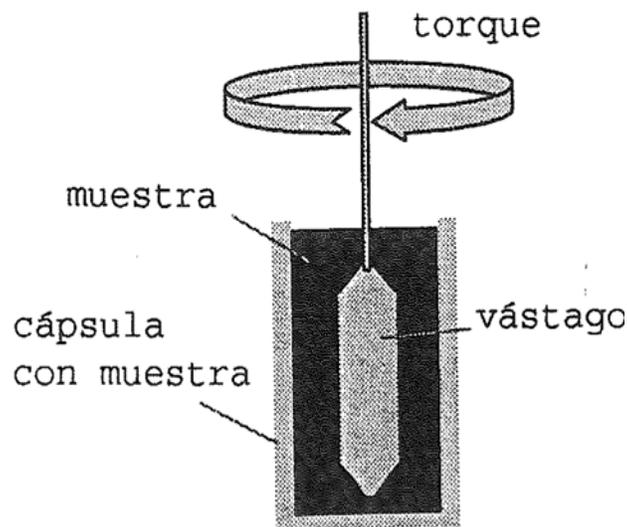


Fig. 20 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional, (McGennis et al., 1998).

Para la elaboración de las gráficas “curvas de viscosidad” se toman los valores que el viscosímetro calculó de torque y temperatura, en ella se puede determinar las temperaturas de mezclado y compactación idóneos para el cemento asfáltico, teniendo en cuenta lo que indica la norma; para compactación una viscosidad de 0.25 a 0.31 Pa-s y paramezclado 0.15 a 0.19 Pa-s (Sandoval, 2017).



III METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Para llevar a cabo este trabajo se utilizó un cemento asfáltico convencional y tres modificados, en estado original, en condición RTFO y PAV, de acuerdo a la especificación Superpave. La Fig 21 muestra un resumen de la metodología empleada y descrita anteriormente.

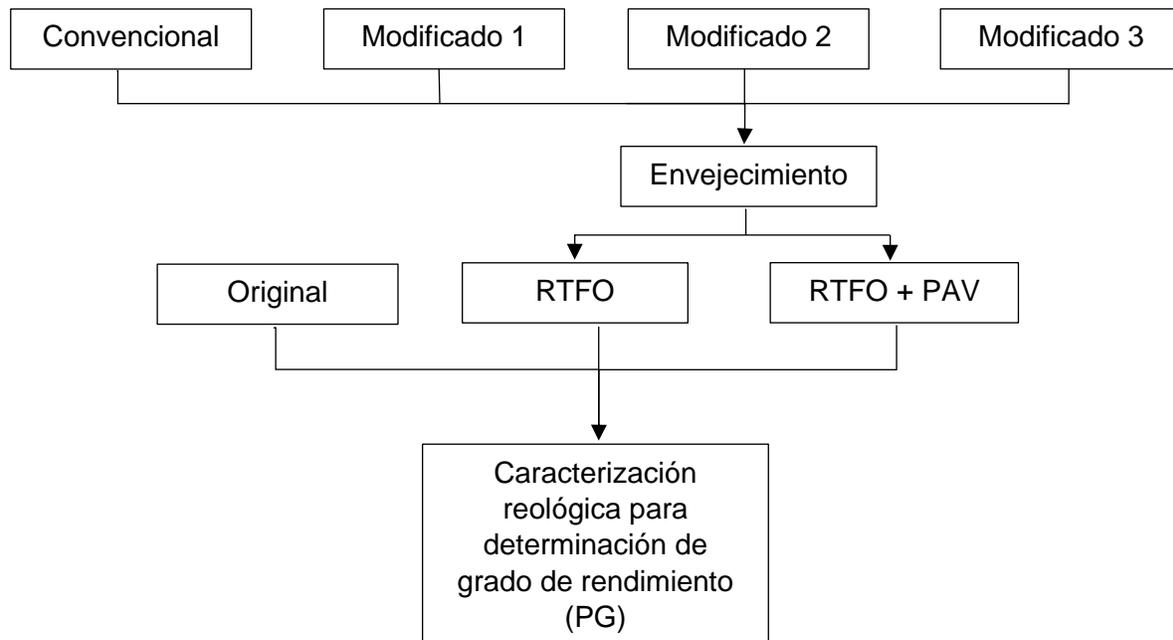


Fig. 21 Diagrama de la metodología utilizada en la investigación.



3.2 Materiales

Los cementos asfálticos utilizados en este estudio provienen de dos empresas estadounidenses diferentes, de los cuales tres de ellos fueron modificados con hule de caucho y el último restante es un cemento asfáltico convencional proveniente de Tula.

Los cementos asfálticos fueron proporcionados por Guaycan Químicos y Petrolíferos S.A. de C.V., planta de asfaltos ubicada en Mexicali, Baja California. En la Fig. 22 se muestra a los cementos asfálticos utilizados.



Fig. 22 Cementos asfálticos utilizados.



3.3 Envejecimiento en cementos asfálticos

La simulación del envejecimiento a corto plazo en los cementos asfálticos, se realizó mediante el ensayo de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada, el cual se lleva a cabo mediante la norma ASTM D 2872.

Para preparar las muestras de ensayo, se debe calentar el cemento asfáltico a 120°C durante 45 minutos, buscando llegar a su forma fluida para poder manipularlo (Fig. 23). En ningún caso se debe superar los 150 °C para evitar un envejecimiento prematuro (McGennis et al., 1998).



Fig. 23 Vaciado de cemento asfáltico en vasos de vidrio RTFO.



Una vez que el cemento asfáltico se encuentre lo suficientemente fluido, se debe vaciar 35 ± 0.5 gr de cemento asfáltico en cada una de los vasos de vidrio (8 vasos en total), inmediatamente después de verter la muestra se deben de colocar en posición horizontal intentando recubrir toda su superficie cilíndrica. Al finalizar el llenado de los vasos, se deben dejar enfriar durante 60 minutos o un máximo de 180 minutos para que vuelvan a la temperatura ambiente y poder ingresarlas al horno RTFO, Fig. 24.



Fig. 24 Vasos en reposo después de verter el cemento asfáltico.

Para ejecutar el ensayo, el horno RTFO debe precalentarse a la temperatura de $163 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por un mínimo de 2 horas. Una vez que se ha estabilizado la temperatura, el aire debe ser ajustado a una presión de 4 litros/minuto y posteriormente se pueden colocar los vasos en su interior y esperar a que su temperatura vuelva a estabilizarse (no exceder los 10 minutos, debido a que el



cemento asfáltico puede comenzar a envejecer antes de tiempo), Fig. 25. A partir de que la temperatura de ensayo sea estable el tiempo del ensayo es de 85 minutos.



Fig. 25 Interior de Horno RTFO.

Una vez terminado el ensayo, se seleccionan dos vasos para determinar la pérdida de masa, con la ecuación 1 que se muestra en el Capítulo 2.2. El residuo de cemento asfáltico de los seis vasos restantes se empleará como material para la prueba PAV y para la determinación de pruebas reológicas a partir del equipo DSR, Fig. 26.

Un punto importante al recuperar el residuo de cemento asfáltico es que las paredes de los vasos no se deben raspar, esto con el fin de evitar que el material adherido a las paredes se encuentren con un mayor envejecimiento.



Fig. 26 Vasos RTFO al final del ensayo.

Por otra parte, para llevar a cabo la simulación del envejecimiento a largo plazo, se empleó el ensayo Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV). El procedimiento consiste en precalentar la vasija de presión de 10 a 15°C por arriba de la temperatura de acondicionamiento durante 2 horas, para reducir la caída de la temperatura del PAV durante el proceso de carga, y así minimizar el tiempo requerido para estabilizar el sistema, de acuerdo a la temperatura requerida de prueba, como se indica en la Tabla 2 Clasificación por grado de rendimiento. que se muestra en el Capítulo 2.4.1.

El equipo cuenta con 10 bandejas, las cuales deben de contener 50 ± 0.5 g de cemento asfáltico residuo de RTFO, durante el vertido del material se hace una



distribución uniforme sobre toda la superficie de la bandeja con el fin lograr un espesor homogéneo, Fig. 27.



Fig. 27 Vaciado y pesado de cemento asfáltico en bandejas PAV.

Las bandejas PAV se colocan en un bastidor de manera horizontal para evitar el derrame del material; el bastidor se coloca dentro de la cámara, se ajusta el sistema de cierre para lograr un sello hermético y evitar fugas de presión, esto se debe realizar de la manera más rápida posible para evitar pérdida de calor dentro de la cámara, en la Fig. 28 se observa este procedimiento.



Fig. 28 Bandejas dentro del bastidor y cerrado hermético de Vasija PAV.

Cuando la temperatura dentro de la cámara no difiera más de 2°C se procede a liberar el aire comprimido extra seco, hasta llegar a la presión de $2.1 \pm 0.1\text{ MPa}$ (el equipo libera y regula el aire de manera automática y no requiere intervención del operador), al concluir este paso la prueba comienza, la cual tiene una duración de $20\text{ horas} \pm 10\text{ minutos}$, al finalizar el ensayo se debe liberar el aire dentro de la cámara de manera paulatina utilizando la válvula de purga de presión de aire, este proceso durará entre 8 y 10 minutos para igualar la presión interna y externa en la vasija a presión, evitando así el burbujeo excesivo y la formación de espuma en el cemento asfáltico. (Fig. 29).



Fig. 29 Cemento asfáltico al finalizar prueba PAV.

Para eliminar el aire atrapado en las muestras, el cemento asfáltico recuperado se vacía en cápsulas para posteriormente ingresarlas al horno de vacío para su desgasificación, Fig. 30. El horno se precalienta a una temperatura de $170 \pm 5^\circ \text{C}$ durante 1 hora, al introducir las cápsulas se presenta una pérdida de temperatura y es necesario esperar su estabilización para iniciar la prueba. Una vez estabilizada la temperatura se aplica una presión de vacío de $30 \pm 2.5 \text{ kPa}$ durante 30 minutos, que es la duración total del ensayo.



Fig. 30 Cemento asfáltico en equipo desgasificador.

Finalmente se recupera el cemento asfáltico envejecido en PAV en una cápsula y se homogeneiza para su caracterización reológica posterior mediante el equipo DSR y el ensayo BBR.

3.4 Determinación del Grado de Rendimiento (PG)

Como se mencionó anteriormente, el Grado PG es el intervalo de temperaturas máxima y mínima entre las que un cemento asfáltico convencional o modificado se desempeña de manera satisfactoria (SICT, 2018).

3.4.1 Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

Para llegar a la determinación del grado PG a temperaturas medias y altas, se utiliza el equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR) para evaluar el comportamiento visco-



elástico que experimenta el cemento asfáltico a temperaturas de servicio intermedias y altas. El procedimiento de ensayo esta regido bajo la norma AASHTO TP 5 93. El equipo DSR mide dos parámetros fundamentales: el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) (Castro et al., 2015).

Para determinar el grado PG en función a los parámetros G^* y δ , es necesario evaluar el cemento asfáltico en condición original y envejecido a corto y largo plazo mediante RTFO y PAV, respectivamente.

De acuerdo a las características de la muestra se emplearán geometrías diferentes; la geometría de 25 mm se utiliza en condición original y RTFO, mientras la geometría de 8 mm se utilizará en residuo de PAV (Motamed et al., 2011).

Para la preparación de las muestras de ensayo se utilizan moldes de silicona del mismo diámetro que las geometrías, es decir 25 mm y 8 mm (Fig. 31).

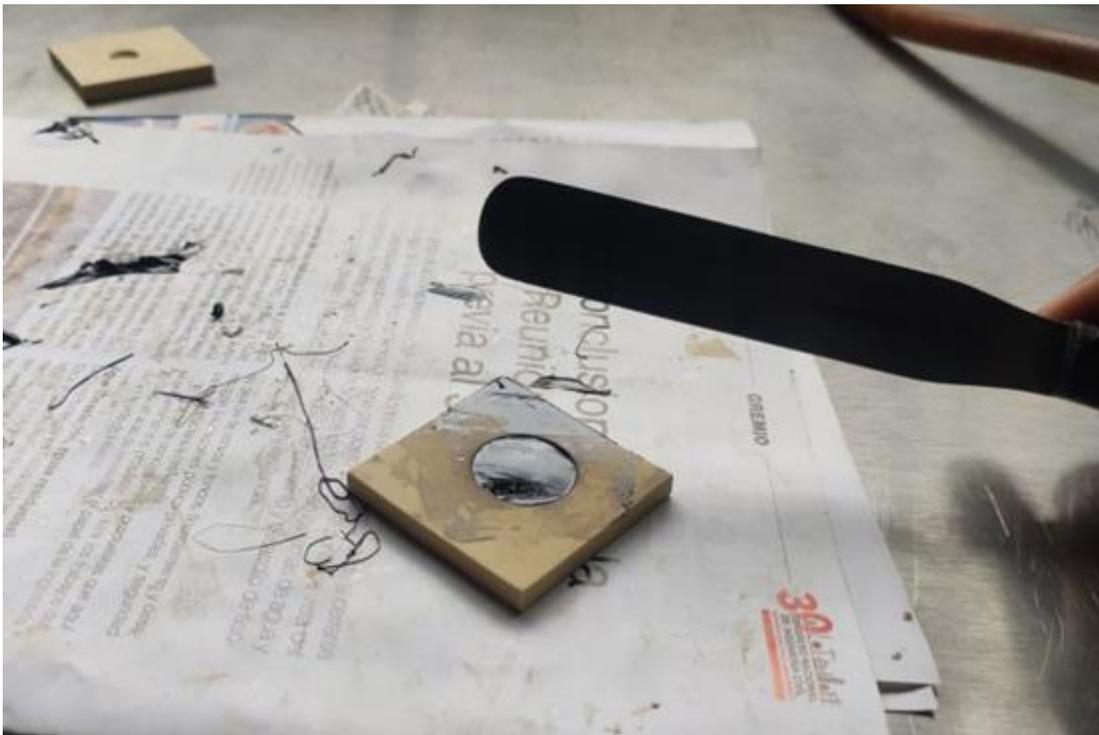


Fig. 31 Muestra de cemento asfáltico de 25 mm.



Las especificaciones para cada ensayo, dependiendo del grado de envejecimiento del cemento asfáltico son:

- 1) Cemento asfáltico original (sin envejecimiento) y envejecido en horno RTFO. Se emplean geometrías de 25 mm y separación (GAP) de 1 mm para temperaturas altas: 46 a 82°C o más (aumentando a cada 6°C).
- 2) Cemento asfáltico con envejecimiento (PAV). Se emplean geometrías de 8 mm y separación (GAP) de 2 mm para temperaturas entre 4°C y 40°C (iniciando con la temperatura mayor y disminuyendo a cada 3°C).

La preparación del equipo comienza con la revisión de las geometrías, se deben limpiar y secar cuidadosamente para asegurar la adherencia uniforme de la muestra durante su montaje, se debe tener cuidado en su manipulación para evitar dañarlas.

Se elige la geometría de acuerdo a las características de la muestra, es decir, dependiendo del grado de envejecimiento. La temperatura de prueba se selecciona de acuerdo con la Tabla 2 Clasificación por grado de rendimiento, Capítulo 2.4.1. Las geometrías se montan en el equipo para ambientarse a la temperatura de prueba con un rango de error de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Una vez que sea colocada la muestra sobre la geometría, como se observa en la Fig. 32, se procede a realizar el GAP, con el fin de presionar la muestra entre ellas, hasta que la distancia entre las geometrías sea de 0.05 mm mayor que la distancia especificada para la prueba, ya sea de 1 mm o 2 mm y al finalizar este procedimiento se encontrará lista la muestra para su enrase.

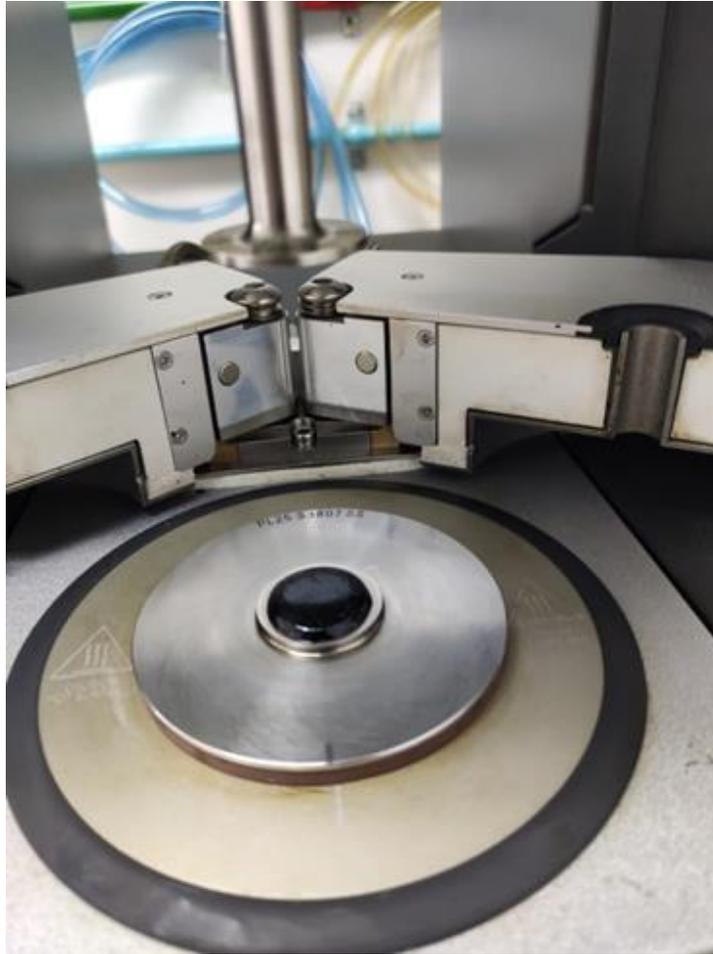


Fig. 32 Colocación de la muestra en el equipo DSR.

Se enrasa cuidadosamente el exceso de cemento asfáltico que sobresale del perímetro de la geometría, como se observa en la Fig. 33. La importancia del enrase es para evitar que los resultados del ensayo se vean afectados por un esfuerzo mayor debido a la adherencia del cemento asfáltico a la paredes de las geometrías.



Fig. 33 Exceso de cemento asfáltico en el perímetro de las geometrías y enrasado.

La prueba consiste en aplicar 10 ciclos a una deformación o esfuerzo cíclico de valor predeterminado, a una frecuencia de 10 rad/s. Hecho lo anterior, se aplican otros 10 ciclos en las mismas condiciones y se registran las lecturas correspondientes G^* y δ .

Para la determinación del grado PG el equipo crea una relación entre G^* y $\text{sen}(\delta)$, en función con su condición de envejecimiento como se indica a continuación:

- 1) Para el cemento asfáltico en estado original : su relación de $G^*/\text{sen}(\delta)$ será como mínimo de 1.0 kPa.
- 2) Para el cemento asfáltico en estado RTFO: su relación de $G^*/\text{sen}(\delta)$ será como mínimo de 2.2 kPa.
- 3) Para el cemento asfáltico en estado PAV: su relación de $G^*/\text{sen}(\delta)$ será como máximo de 5000 kPa.



Si los valores en la relación de G^* y $\text{sen}(\delta)$ no se acercan al valor que establece la norma, el equipo continúa con la siguiente temperatura, aumentando cada 6°C .

En el caso particular de las temperaturas intermedias para el residuo PAV, el ensayo se realiza tomando el valor mayor de temperatura de acuerdo a la tabla 2, y decreciendo a cada 3°C .

El barrido de temperaturas finaliza cuando la relación de G^* y $\text{sen}(\delta)$ se acerca al valor que establece la norma ASTM D946.

3.4.2 Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR)

Para obtener el grado de rendimiento PG inferior, es decir, la temperatura baja donde el cemento asfáltico tendrá un rendimiento eficiente, se debe llevar a cabo la prueba de Reómetro de Viga a Flexión (BBR), la cual, mide la deflexión en el punto medio de una viga de cemento asfáltico simplemente apoyada, sometida a una carga constante aplicada en su punto medio. El dispositivo opera en modo de carga, es decir, no se obtienen mediciones de recuperación.

La preparación de los moldes del ensayo se llevan a cabo extendiendo una capa muy delgada de vaselina en las paredes del molde, esta servirá para adherir un acetato a las piezas de aluminio, una vez colocado, se debe expulsar cualquier burbuja de aire atrapada entre la barra y el acetato, Fig. 34. Si persisten las burbujas de aire, se desarmará el molde y se volverá a aplicar vaselina sobre las caras laterales de aluminio.

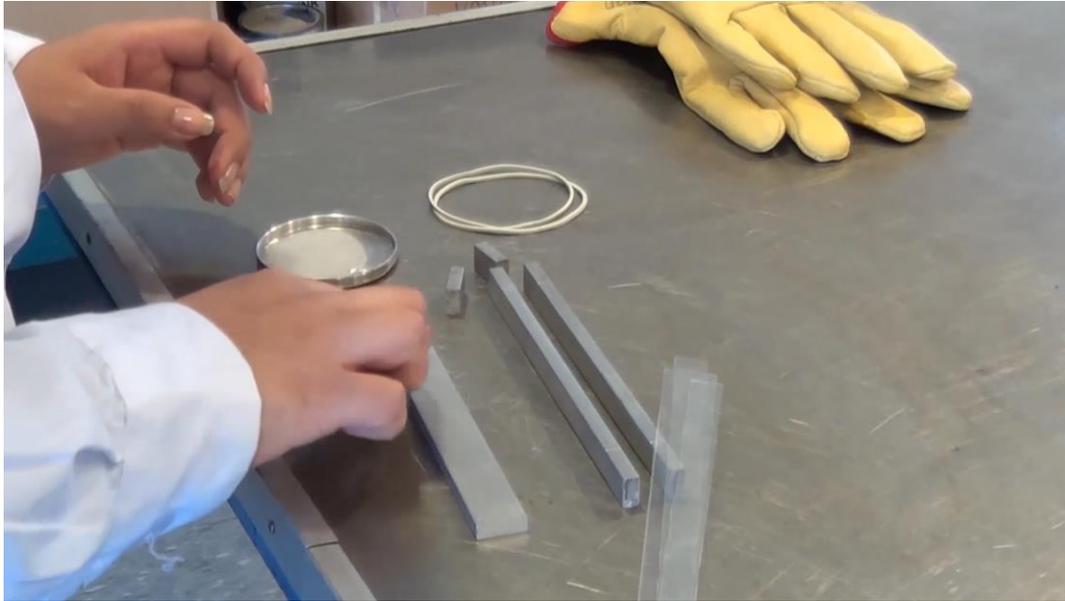


Fig. 34 Aplicación de vaselina en el molde.

Posteriormente, se cubren las piezas de acetato con una mezcla de glicerol y talco, estas funcionarán como aislante para prevenir que el cemento asfáltico se adhiera a las piezas del molde directamente, Fig. 35.



Fig. 35 Acetatos en el molde.



Cuando las piezas del molde se encuentran engrasadas, se procede a ensamblar todas las piezas las cuales se sostienen mediante anillos de goma, estos lograrán aplicar la fuerza suficiente para mantener la forma del molde, Fig. 36.

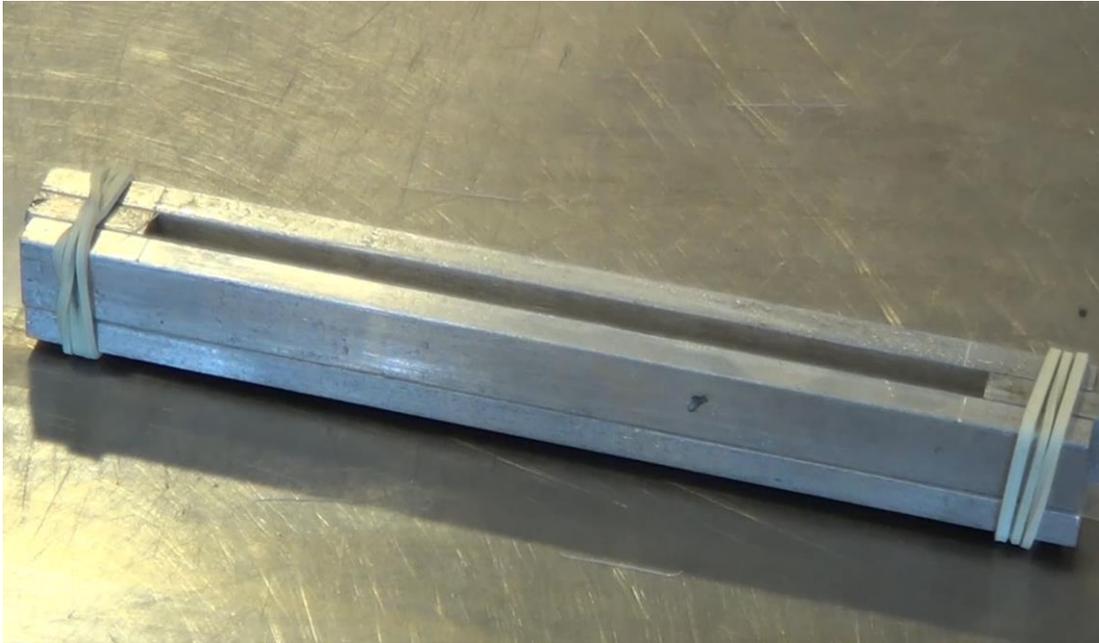


Fig. 36 Molde de ensayo BBR ensamblado.

Para la fabricación de los especímenes de ensayo, es necesario calentar el cemento asfáltico a una temperatura que permita su fluidez para poder verterlo dentro del molde. Si el cemento asfáltico es demasiado viscoso y no fluye fácilmente al vaciarlo al molde, será necesario aumentar la temperatura hasta alcanzar un buen nivel de manejabilidad. Esta consideración, es debido a su condición de envejecimiento en PAV, la cual, lo vuelve más rígido y por tanto, requiere mayores temperaturas para alcanzar la fluidez.

Una vez que el cemento asfáltico se encuentra lo suficientemente fluido, se procede a verter continuamente de un extremo al otro en un solo paso dejando un exceso sobre el nivel del molde para asegurar su correcto llenado. Se deja enfriar 45 a 60 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, empleando una espátula caliente, se engrasa el borde del molde, retirando el exceso de cemento asfáltico. Se debe



planificar el ensayo de manera que se realice dentro de las 4 horas siguientes del llenado de los moldes, Fig. 37.



Fig. 37 Llenado de cemento asfáltico y enrase.

Antes de realizar el ensayo, se debe de enfriar el molde de aluminio con cemento asfáltico en un congelador a $-5 \pm 7^\circ \text{C}$ entre 5 a 10 min, con el objetivo de rigidizar la viga de cemento asfáltico, de modo que pueda ser desmoldada con facilidad y sin sufrir deformaciones, Fig. 38. Algunos grados PG de cemento asfáltico más blandos pueden requerir temperaturas más bajas, para este proceso.



Fig. 38 Desmolde de viga.

Una vez desmoldada la muestra, se coloca en el baño de ensayo, es importante mencionar que por ningún motivo se debe introducir la muestra sin desmoldar, debido a que se pueden producir fluctuaciones de temperatura.

El periodo de acondicionamiento en el baño de ensayo tendrá una duración de 60 ± 5 minutos. El fluido del baño de acondicionamiento está compuesto por glicol etileno, metanol y agua. El ensayo se lleva a cabo a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la temperatura baja del cemento asfáltico, con una precisión de $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, de acuerdo con las especificaciones de la clasificación por grado de rendimiento de la Tabla 2. mostrada en el Capítulo 2.4.1.

Al finalizar el periodo de acondicionamiento se procede a colocar la viga de cemento asfáltico sobre los apoyos, tomándola con unas pinzas para facilitar su manipulación y evitando extraerla del baño de ensayo, Fig. 39.



Fig. 39 Colocación de viga de cemento asfáltico sobre los apoyos.

Para comenzar con el ensayo de prueba se debe aplicar a la viga una carga de contacto de 35 ± 10 mN, para asegurar el contacto entre ella y la cabeza de carga, esta carga se deberá de aplicar incrementando ligeramente hasta alcanzar los 35 ± 10 mN. El tiempo para la aplicación de la carga y el ajuste de contacto no deberá de exceder los 10 segundos.

Inmediatamente después de la aplicación de la carga de contacto, esta se incrementa hasta la carga de asentamiento de 980 ± 50 mN por 1.0 ± 0.1 segundo. Posteriormente, se reduce la carga nuevamente a 35 ± 10 mN permitiendo la recuperación de la viga durante 20.0 ± 0.1 segundos.

Al final del periodo de recuperación, se debe aplicar nuevamente la carga de 980 ± 50 mN por 240 segundos. Durante este periodo se registra la deflexión de la viga.

Se debe verificar que la carga de contacto sobre la viga, retorna al finalizar la carga de asentamiento inicial y al finalizar el ensayo. Si la viga no retorna, la prueba no es



válida y se debe de calibrar el reómetro. En la Fig. 40, se puede observar la deformación que sufre la viga de cemento asfáltico al finalizar el ensayo.



Fig. 40 Deformación de viga BBR.

El registro de los resultados, se realiza con un software en un equipo de cómputo conectado al BBR para mayor control de los parámetros y registro de los resultados de carga y flexión.



3.5 Viscosímetro Rotacional (RV)

Este ensayo se lleva a cabo mediante el equipo Viscosímetro Rotacional Brookfield, cuenta con un termo recipiente, el cual tiene como objetivo mantener la temperatura del ensayo durante el barrido, este se debe precalentar durante una hora a la temperatura inicial del ensayo, Fig. 41.



Fig. 41 Termo recipiente y controlador de temperatura.

Para la preparación de la muestra de cemento asfáltico, se debe calentar a 120°C, hasta alcanzar la fluidez necesaria para su vaciado en la cápsula de prueba, la cápsula del viscosímetro se ingresa al termo recipiente antes de su llenado, con el fin de ambientarlo a la temperatura de prueba (McGennis et al., 1998).

Posteriormente se introduce la cantidad de cemento asfáltico, esta depende de las dimensiones del vástago que se pretenda utilizar, ya que a mayor medida de



vástago menor cantidad de cemento asfáltico, la elección del vástago estará en función de la viscosidad del cemento asfáltico (Fig. 42). Se debe tener precaución con el volumen de material que se vacía en la cápsula, ya que la prueba es susceptible respecto a cantidad del cemento asfáltico, debido a que el vástago deber ser recubierto en su totalidad por el material, para lograr tener una mejor precisión en los resultados.

El peso de cemento asfáltico por cada vástago utilizado en este trabajo se presentan a continuación:

- Vástago Tr 8 necesitará 8.1 gr.
- Vástago Tr 9 necesitará 10.6 gr.



Fig. 42 Vaciado de cemento asfáltico y vástagos del viscosímetro rotacional.



La cápsula con el cemento asfáltico en su interior, se coloca en el termo recipiente, como se muestra en la Fig. 43, para estabilizar la temperatura; usualmente tarda alrededor de 15 minutos.



Fig. 43 Cápsulas con cemento asfáltico dentro del termo recipiente.

Una vez estabilizada la temperatura de ensayo se comienza con el barrido de temperaturas en un rango de 120 a 180° C, iniciando por la temperatura más baja, aumentando en intervalos de 10° C, se debe de verificar que durante el barrido de temperaturas el torque se encuentre en un intervalo de 10 a 98%, si disminuye o aumenta este intervalo las mediciones de viscosidad no serán confiables y será necesario sustituir el vástago o bien, modificar la velocidad de las revoluciones por minuto (RPM).



Se seleccionan tres RPM diferentes y en cada temperatura se registran tres lecturas de viscosidad en intervalos de 1 minuto (al finalizar se promedian los tres valores).

Al finalizar la prueba se podrá obtener la carta de viscosidad específica para cada cemento asfáltico con la relación de temperatura y viscosidad.

IV PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Envejecimiento en cementos asfálticos

Tanto en la prueba de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) como en la prueba de Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) son ensayos de acondicionamiento del cemento asfáltico para las pruebas que se realizan en el equipo DSR.

A continuación, las Tablas 3 a 6 muestran los resultados obtenidos de la prueba RTFO para la pérdida de masa de los cementos asfálticos en estudio.

Tabla 3. Pérdida de masa del cemento asfáltico convencional.

Cemento asfáltico convencional		
Registro de pesos (gr)	vaso 1	vaso 2
Antes de envejecer		
Peso del frasco	167.45	168.85
Peso del frasco + asfalto	202.77	203.922
Peso del asfalto	35.32	35.072
Después de envejecer		
Peso del frasco + asfalto	202.685	203.838
Cambio de masa	-0.085	-0.084
Porcentaje	-0.240657	-0.239507
Promedio (%)	-0.240082075	



Tabla 4. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 70-22 W.

Cemento asfáltico 70-22 W		
Registro de pesos (gr)	vaso 1	vaso 2
Antes de envejecer		
Peso del frasco	167.477	170.082
Peso del frasco + asfalto	202.712	205.461
Peso del asfalto	35.235	35.379
Después de envejecer		
Peso del frasco + asfalto	202.376	205.151
Cambio de masa	-0.336	-0.31
Porcentaje	-0.953597	-0.876226
Promedio (%)	-0.914911643	

Tabla 5. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 76-22 Us Polyco.

Cemento asfáltico 76-22 Us Polyco		
Registro de Pesos (gr)	vaso 1	vaso 2
Antes de envejecer		
Peso del frasco	169.871	169.743
Peso del frasco + asfalto	205.077	204.805
Peso del asfalto	35.206	35.062
Después de envejecer		
Peso del frasco + asfalto	204.747	204.466
Cambio de masa	-0.33	-0.339
Porcentaje	-0.93734	-0.966859
Promedio (%)	-0.952099467	



Tabla 6. Pérdida de masa del cemento asfáltico PG 76-22 UP.

Cemento Asfáltico 76-22 UP		
Registro de Pesos(gr)	vaso 1	vaso 2
Antes de envejecer		
Peso del frasco	168.871	167.743
Peso del frasco + asfalto	203.972	202.865
Peso del asfalto	35.101	35.122
Después de envejecer		
Peso del frasco + asfalto	203.652	202.535
Cambio de masa	-0.32	-0.33
Porcentaje	-0.911655	-0.939582
Promedio (%)	-0.925618483	

Se puede observar que, en el cemento asfáltico convencional, mostrado en la Tabla 3, presenta una pérdida mínima de volátiles de -0.2 %, esto se atribuye a la absorción de oxígeno que contrarrestó la pérdida de masa, en comparación de los cementos asfálticos modificados.

En los cementos asfálticos modificados se observó una pérdida de masa menor al 1%, como indica la normativa. El cemento asfáltico PG 76-22 Us Polyco, fue el que se acercó más a la pérdida del 1%, específicamente perdió el -0.95%, esto se debe a que perdió una mayor cantidad de volátiles.

Los dos cementos asfálticos restantes son: PG 70-22 W y el PG 76-22 UP, estos comparten un valor similar en la pérdida de volátiles, de -0.91 % y -0.92 %, respectivamente. Ambos se encuentran dentro de lo indicado por la norma.

Por otro lado, la prueba de Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) únicamente proporciona material de residuo de cemento asfáltico. Para esta prueba se utilizó una temperatura de 100 °C durante 20 horas y 5 minutos a una presión de aire extra seco de 2.1 MPa.



4.2 Determinación del Grado de Rendimiento (PG)

Los resultados obtenidos en la caracterización reológica de los cuatro cementos asfálticos estudiados se presentan a continuación, partiendo de los resultados del reómetro de corte dinámico de los cementos asfálticos en condición original y en los dos periodos de envejecimiento. Posteriormente se muestran los resultados del Reómetro de Viga a Flexión para la condición de envejecimiento PAV.

4.2.1 Determinación de temperaturas medias y altas a través del equipo Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

Para la determinación del grado de rendimiento PG superior, se realizaron tres barridos con cada estado de envejecimiento, para cada cemento asfáltico con una repetitividad de tres pruebas por cemento asfáltico, es decir, un total de treinta y seis muestras, con el fin de obtener valores reales que se aproximen entre sí.

En la Tabla 7, se presenta una síntesis de los resultados que se obtuvieron en el equipo DSR, para la determinación del grado PG:

Se observa el valor que resulta de la relación entre G^* y $\text{Sen}(\delta)$ para la determinación de su grado PG correspondiente, de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2 mostrada en el capítulo 2.4.1. Se muestra que el grado PG superior del cemento asfáltico convencional es de 64° C, en la condición de RTFO el grado de rendimiento fue de 76° C debido a que el cemento asfáltico se vuelve más rígido, debido a su condición de envejecimiento. Dicho esto, debemos elegir el grado PG que logre cumplir con ambos criterios en condición original y RTFO.



Tabla 7. Resultados obtenidos en equipo DSR.

Ensayo del cemento asfáltico original	Método/ Especificación	CONDICIÓN ORIGINAL			
		Convencional	PG 70-22 W	PG 76-22 US POLYCO	PG 76-22 UP
G*/Sen (δ) kPa	AASHTO T 315 / 1.00 mín.	1.77	1.50	1.48	1.48
Grado PG	-	64	76	76	76
DEL RESIDUO DE RTFO					
Pérdida de masa, %	AASHTO T 240 / 1.00 mín.	-0.2395	-0.914	-0.952	-0.925
G*/Sen (δ) kPa	AASHTO T315 /2.20 MIN.	2.44	3.57	3.14	2.28
Grado PG	-	76	76	82	82
DEL RESIDUO DE PAV					
G*Sen (δ) kPa	AASHTO T315 /5000 máx.	4882	3671	4626	3773
Temperatura de prueba	-	22	25	25	28
Grado PG Designado		70	76	76	76

Para el cemento asfáltico denominado PG 70-22 W, su grado de temperatura superior en condición original es de 76° C, mientras que para la condición RTFO



presentó el mismo comportamiento, es decir, misma temperatura. Con ello se puede entender que su grado PG será 76° C debido a que en ambos criterios se cumple con lo que especifica la normativa en función a la relación de $G^*/\text{Sen}(\delta)$. Se observó que no presentó un aumento en la rigidez después del envejecimiento en RTFO, debido a que su tipo de modificante ayuda a contrarrestar el fenómeno de envejecimiento.

Para los dos cementos asfálticos restantes, el PG 76-22 Us Polyco y el PG 76-22 UP, comparten el mismo comportamiento en condición original como en RTFO. En ambos materiales su grado PG superior resultante es de 76° C en condición original y de 82° C en RTFO, por lo tanto, se considera un grado PG 76 debido a que en ambos criterios se cumple con lo que especifica la normativa de clasificación de grado PG.

Siguiendo con las temperaturas intermedias, el cemento asfáltico que tuvo la temperatura más baja, fue el convencional, esto se esperaba debido a que no contiene modificantes que le ayuden a mejorar su comportamiento ante la deformación que sufre el cemento asfáltico durante su envejecimiento en PAV.

Los cementos asfálticos PG 70-22 W y PG 76-22 Us Polyco, tuvieron resultados similares, ambos cumplieron con la especificación máxima de 5000 kPa que se indica en la norma, a los 25° C. El último cemento asfáltico, PG 76-22 UP, obtuvo una temperatura mayor, específicamente de 28° C, eso se interpreta como un mayor grado de rendimiento.



4.2.2 Determinación de la temperatura baja a través del equipo Reómetro de Viga a Flexión (BBR)

Para la determinación del grado de rendimiento PG inferior, se llevó a cabo la prueba BBR, en la Tabla 8, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados del ensayo BBR.

Ensayo del cemento asfáltico original	Método/ Especificación	DEL RESIDUO DE PAV			
		Convencional	PG 70-22 W	PG 76-22 US POLYCO	PG 76-22 UP
S (t)	AASHTO T313 / 300 máx.	145	154.5	163	192
Temperatura de prueba	-	-12	-12	-12	-12
Valor m	AASHTO T313 / 0.300 mín.	0.316	0.314	0.300	0.302

Se observa que los cuatro cementos asfálticos se encuentran dentro del valor de la pendiente m especificada, también, cumplen con el valor máximo de rigidez 300 (t), y todos comparten la misma temperatura de -12 °C.

El cemento asfáltico convencional, a pesar de no tener modificantes que le proporcionen mejores características, tuvo un desempeño eficiente, en comparación con los modificados.



4.3 Viscosímetro Rotacional (RV)

En la Fig. 44 se muestran las curvas de viscosidad de los cuatro cementos asfálticos estudiados, se observa que los tres cementos asfálticos modificados son más viscosos y hasta cierto punto similares, en comparación con el convencional. Los cementos asfálticos modificados presentaron una viscosidad alta, cercana a los 3000 mPa*s a los 120° C, en comparación con el cemento asfáltico convencional.

En la Fig. 45 se muestra la curva de viscosidad del cemento asfáltico convencional, en donde se aprecia que la viscosidad no supera los 900 mPa*s a los 120° C, debido a que no contienen polímeros que modifiquen su estructura y lo vuelvan más viscoso. Basándose en lo que indica el IMT, la temperatura de mezclado y compactación para este cemento asfáltico quedaría entre 150 a 156 °C y 140 a 144° C, respectivamente.

A partir de la Figura 45 hasta la Figura 48 se presentan las gráficas de viscosidad de los tres cementos asfálticos modificados, para estos tres cementos asfálticos se utilizó el vástago TR 9, debido a su aumento de viscosidad. La Fig. 46 muestra la curva del cemento asfáltico PG 76-22 Us Polyco, donde se aprecia un aumento en los valores de viscosidad, se les atribuye a los modificantes añadidos que lo vuelven más viscoso. Es el más fluido de los tres modificados, su curva se puede apreciar más baja en comparación con los otros dos, pero sigue compartiendo temperaturas similares para compactación y mezclado.

En la Fig. 47 se observa la curva de viscosidad para el cemento asfáltico PG 76-22 UP, se aprecia que su viscosidad no es mayor a la del PG 70-22 W, pero es muy cercana, esto comprueba la similitud de las muestras a pesar de ser un grado PG diferente.

Por último, la curva de viscosidad del cemento asfáltico PG 70-22 W se presenta en la Fig. 48, para este cemento asfáltico se registró la viscosidad más alta de los cuatro cementos asfálticos a la misma temperatura, 120° C, superando los 3,000 mPa*s.



Los cementos asfálticos modificados comparten temperaturas de mezclado y compactación en comparación del cemento asfáltico convencional. Se puede notar que las temperaturas tanto de mezclado como de compactación, se incrementan con la adición de los modificadores.

Es importante recalcar que todas las viscosidades que se obtuvieron a 135° C, se encuentran por debajo de los 3 Pa*s, que indica la norma como máxima permitida, por lo que presentan la fluidez necesaria para ser bombeados y manejados en la planta de mezclado.



CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

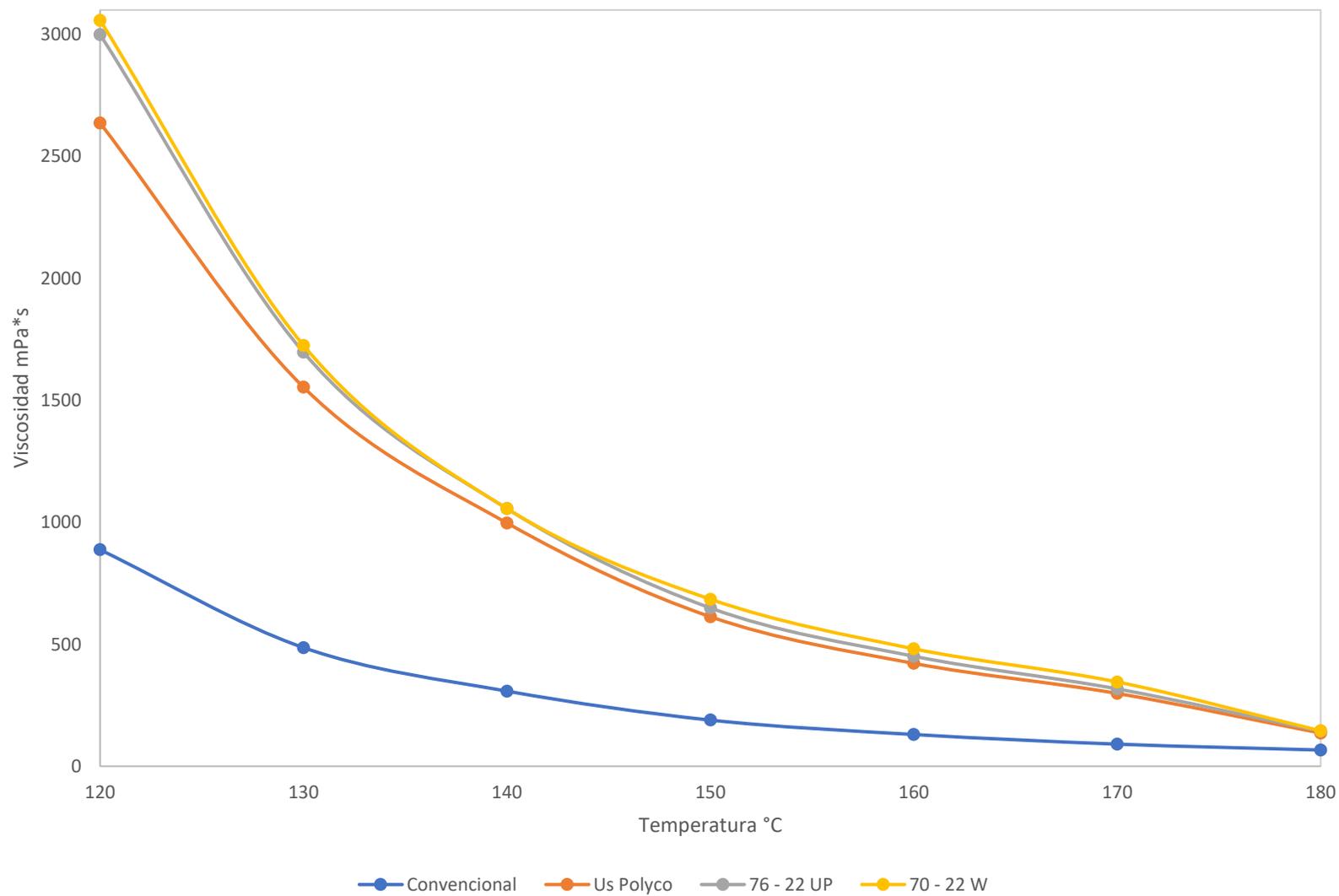


Fig. 44 Viscosidad de Cementos asfálticos.

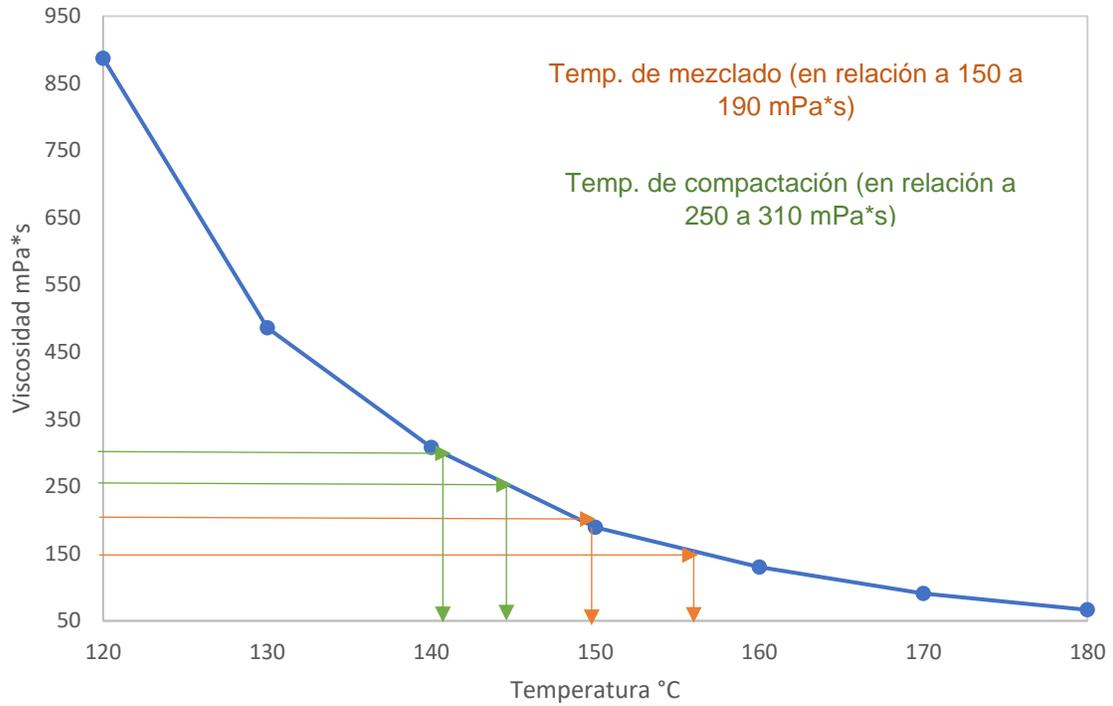


Fig. 45 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico Convencional.

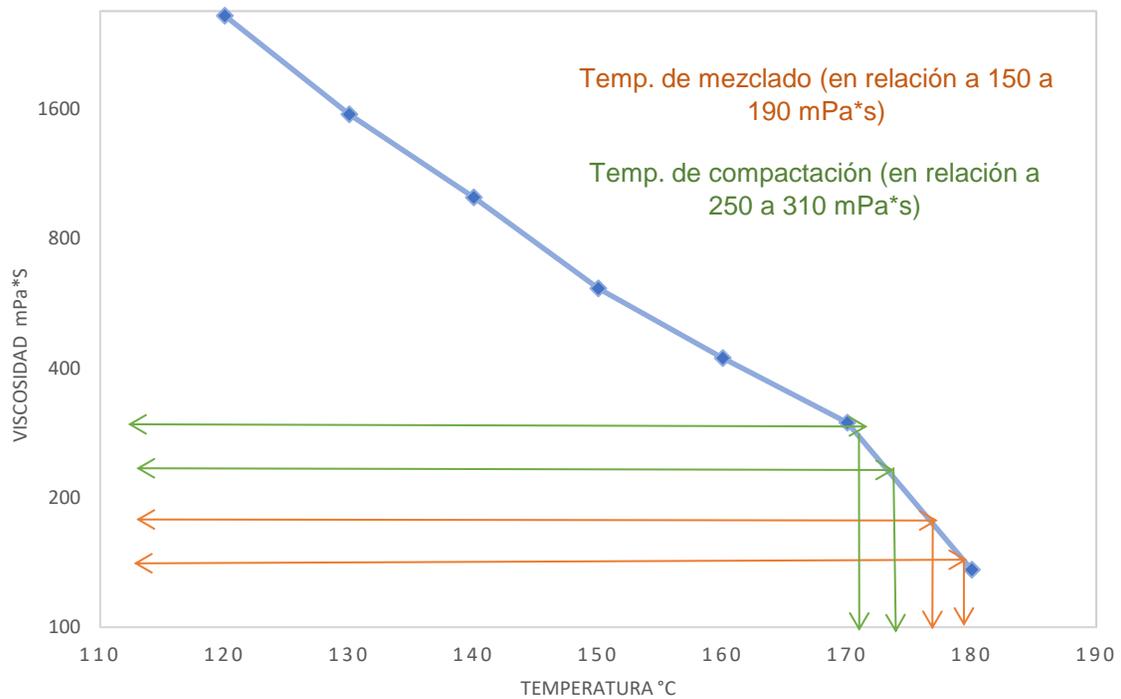


Fig. 46 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 76-22 Us Polyco.

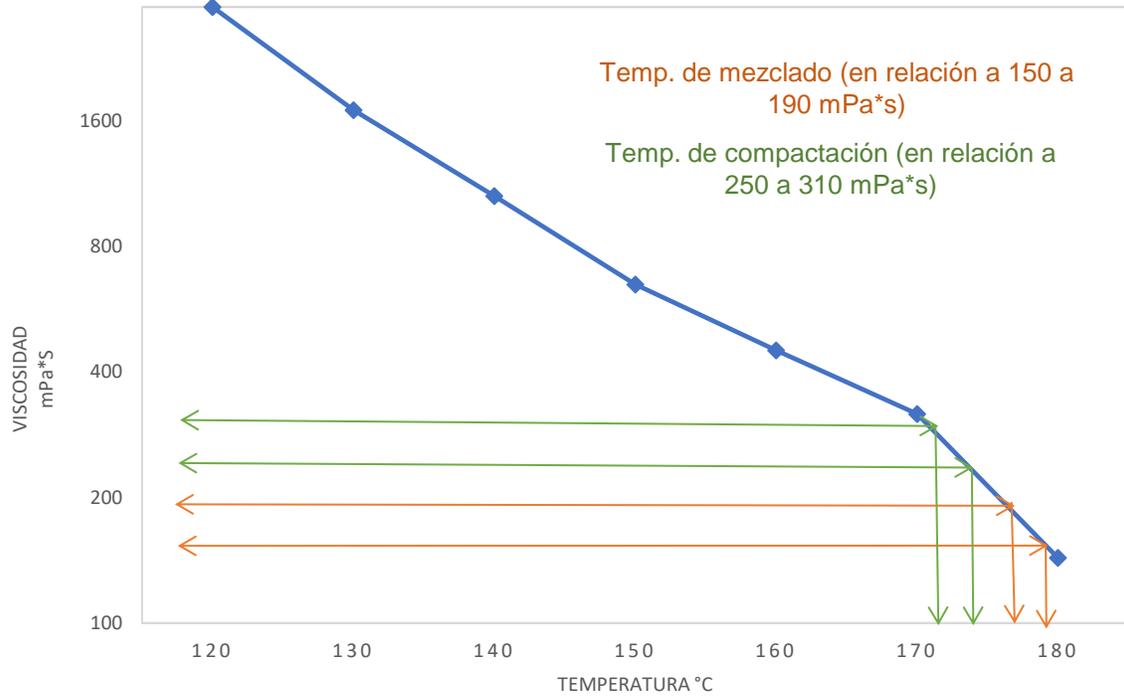


Fig. 47 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 76-22 UP.

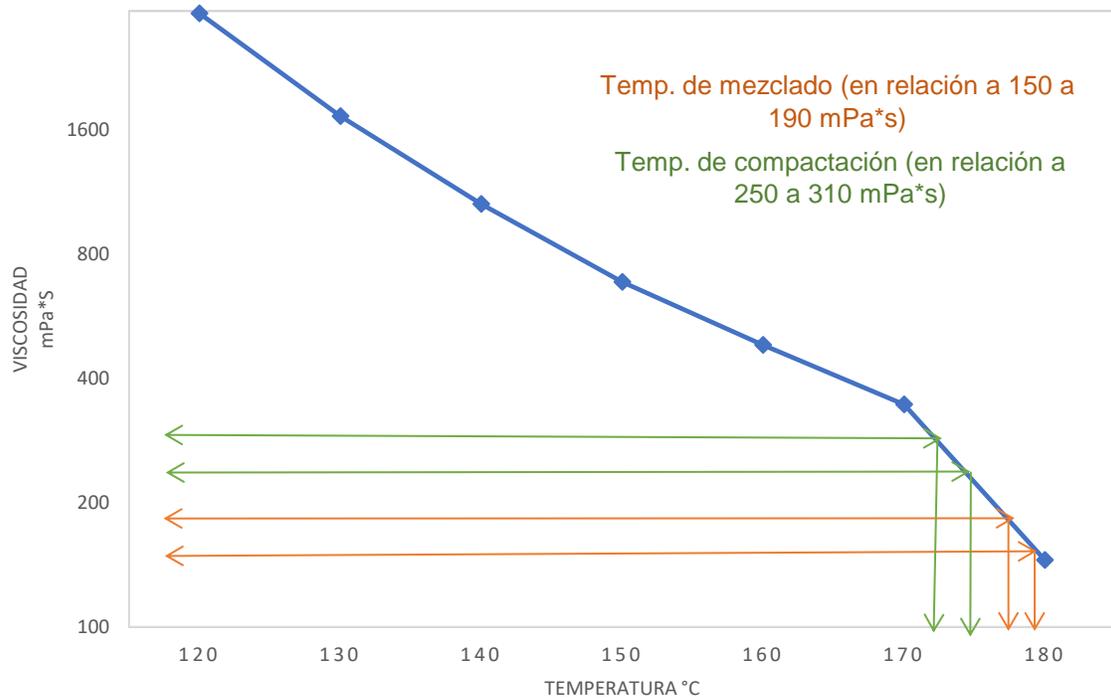


Fig. 48 Curva de Viscosidad Cemento Asfáltico 70-22 W.



V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para realizar esta investigación se llevaron a cabo pruebas reológicas en tres cementos asfálticos modificados y uno convencional, mediante las pruebas Reómetro de Viga a Flexión y en el equipo Reómetro de corte Dinámico, en periodos de envejecimiento a corto y largo plazo. Además, se realizó un barrido de viscosidades para obtener, la curva de viscosidad correspondiente a cada cemento asfáltico.

A continuación, se enuncian las conclusiones de esta investigación.

5.1 Conclusiones

Analizando los resultados de los cuatro cementos asfálticos en comparación con el cemento asfáltico convencional, se puede observar que el desempeño de los tres modificados fue superior en comparación con el convencional.

Por tanto, se exponen las conclusiones en términos generales.

- a) La pérdida de masa del cemento asfáltico convencional fue menor en comparación con los modificados, debido a que no contiene polímeros. Además, presentó una ligera absorción de oxígeno lo cual contrarrestó la pérdida de volátiles.
- b) Los tres cementos asfálticos modificados, perdieron volátiles en un porcentaje muy cercano al 1%, sin embargo, siguen cumpliendo con lo establecido en la normativa.
- c) Para el cemento asfáltico denominado PG 70-22 W, en la determinación de grado de rendimiento en el equipo DSR, se obtuvo un grado superior de 76, lo que comprueba que es necesaria la verificación del grado de rendimiento antes de emplearlo en un proceso de mezclado.



- d) El resultado de clasificación por grado de rendimiento para el cemento asfáltico convencional fue de 64-22, este grado PG era el esperado tomando en consideración que no contenía ningún modificante añadido.
- e) Los resultados de BBR revelaron que el uso de polímeros mejoró la resistencia al agrietamiento del cemento asfáltico en las temperaturas de prueba. En otras palabras, el modificante presente en los cementos asfálticos mejoró la resistencia, haciéndolos más eficientes ante el fenómeno de agrietamiento a baja temperatura.
- f) Los resultados de la viscosidad rotacional demuestran que los cementos asfálticos cumplen con lo establecido en la norma, donde indica que deben tener un valor de viscosidad menor a 3 Pa*s a los 135° C. La viscosidad en los cementos asfálticos modificados es, considerablemente mayor, en comparación a la del cemento asfáltico convencional debido a los polímeros añadidos para su modificación.
- g) De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, se respalda la importancia de la caracterización reológica de los cementos asfálticos, ante un proceso de mezclado, compactación y vida en servicio de un pavimento asfáltico.

5.2 Recomendaciones

En función a las conclusiones obtenidas se recomienda:

- a) Determinar la viscosidad de los cementos asfálticos modificados mediante la prueba de viscosidad a corte cero, para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación (Visscher et al., 2004), debido a que los cementos modificados pueden tener temperaturas de mezclado altas en comparación a los convencionales.



- b) Evaluar el cemento asfáltico mediante la prueba multiple stress creep recovery (MSCR) la cual determina el cumplimiento de fluencia no recuperable, con el fin de clasificar el cemento asfáltico mediante los grados "S", "H", "V" o "E" para cargas de tráfico estándar, alto, muy alto o extremadamente alto, respectivamente, bajo la normativa AASHTO MP 19-10

VI REFERENCIAS

- Aguiar Moya, J. P., Villegas Villegas , E., Leiva Villacorta, F., Rodríguez Castro, E., Loría Salazar, L. G., & Navas Carro, A. (2017). Del empirismo a la caracterización avanzada. PITRA.
- Aguiar Moya, J., Prozzi, J., & Tahmoressi, M. (2001). Número óptimo de giros de superpave según los requisitos del proyecto. Transportation research record.
- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. International Journal of Pavement Engineering, 4:3, 165-176.
- Alonso Aenlle, A., Morales Fournier, J., Garrido Acosta, C., Abreu Hernández, D. O., & Martínez Rojo, T. E. (25 de Octubre de 2021). Determination and Zoning of Asphalts Performance Grade for Cuba According to the Superpave Methodology. Scielo, 38(2).
- Anderson , D., Chris, D., & Bahia, H. (1994). Binder Characterization and Evaluation. Physical Characterization, 3.
- Anderson, D., & Bonaquist, R. (2012). Investigación del envejecimiento en laboratorio a corto plazo de ligantes asfálticos puros y modificados. Transp. Res. rec.
- Asphalt Institute. (1993). Superpave, Performance grade asphalt binder specifications and testing superpave series (Vol. 1). Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2012) Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). AASHTO T 315, Washington, DC
- AASHTO (2016) Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). AASHTO T 313, Washington, DC
- AASHTO (2016) Standard method of test for determining the fracture properties of asphalt binder in direct tension (DT). AASHTO T 314, Washington, DC

AASHTO (2016) Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test). AASHTO T 240, Washington, DC

AASHTO (2016) Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). AASHTO R 28, Washington, DC

AASHTO (2016) Standard specification for performance-graded asphalt binder. AASHTO M 320, Washington, DC

AASHTO (2017). Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder American Association of State Highway and Transportation Officials, Norma M 320-17, Washington, DC, EUA.

AASHTO MP19. (2010). Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.

AASHTO TP70. (2012). Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).

ASTM (2000). Standard specification for penetration-graded asphalt cement for use in pavement construction. ASTM D946, West Conshohocken.

ASTM (2012) Standard test method for determining the fracture properties of asphalt binder in direct tension (DT). ASTM D6723, West Conshohocken, PA

ASTM (2015) Standard specification for performance graded asphalt binder. ASTM D6373, West Conshohocken, PA

ASTM (2015) Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. ASTM D7175, West Conshohocken, PA

ASTM (2016) Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). ASTM D6648, West Conshohocken, PA

- ASTM (2018) Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). ASTM D6521, West Conshohocken, PA
- ASTM (2019) Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). ASTM D2872, West Conshohocken, PA
- ASTM D2872-12e1, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- Avellán Cruz , M. D. (2007). Asfaltos modificados con polímeros (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Bahia, H., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., & Anderson, R. (2001). Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP Report.
- Bitafal. (18 de Mayo de 2020). Reología del asfalto. Obtenido de <https://bitafal.com.uy/reologia-del-asfalto/>
- Bocanegra Martinez , D. (2019). Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas modificadas con hule molido devulcanizado. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro.
- Cardenas , J., & Fonseca, E. (2009). Modelo do comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado com polímero reciclado. EIA, 125-137.
- Casey, D., McNally, C., Gibneya, A., & Gilchrist, M. (2008). Desarrollo de un aglutinante modificado con polímero reciclado para uso en asfalto de masilla de piedra (Vol. 52). Journal of Resources, Conservation and Recycling.
- Castillo, J. F. (2003). Caracterización de asfaltos con tecnología SUPERPAVE y análisis de ahuellamiento. (Tesis de Maestría). Universidad de los Andes, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Castro López, W. A., Rondón Quintana, H. A., & Barrero Calixto, J. C. (29 de Octubre de 2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un diseño de PEBD. SciElo, 21(1).
- Christensen, D., & Anderson, D. (1992). Interpretación de datos de pruebas mecánicas dinámicas para cementos asfálticos de pavimentación. Tecnología de pavimentación de asfalto, 67-116.
- Cusi Ramos, J. C., & Duran Egoavil, M. R. (2021). Determinación del grado de desempeño - superpave de cementos asfálticos en control de fallas de pavimentos flexibles, carretera huancavelica – Santa Inés. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional De Huancavelica, Huancavelica.

- Daly, W., Negulescu I., I., & Glover, I. (2010). A Comparative Analysis Of Modified Binders: Original Asphalts And Materials Extracted From Existing Pavements. FHWA/LA.10/462.
- Delgadillo, R., Segovia, M., Whar, C., & Thenoux, G. (2017). Superpave zoning for Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(1), 25-36.
- Fernández Gómez, W., Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (Abril de 2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e investigación*, 33(1), 5-12.
- Fernández, W., Rondón, H., Daza, C., & Reyes, F. (2014). Los efectos del envejecimiento ambiental en los asfaltos colombianos . *Energía Combustibles*, 321-328.
- Franco Palma, J. E., & García Solarte, W. A. (2019). Comportamiento del asfalto ecuatoriano ante el envejecimiento. (Tesis de Licenciatura). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2003). Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 22.
- Hoiberg, A. (1965). *Bituminous materials* (Vol. 2). New York: John Wiley & Sons.
- Huang, H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Vol. 2). New Jersey: Pearson Prentice.
- J. Barth, E. (1984). *Asphalt: Science And Technology*. USA: Gordon and Breach Science Publishers.
- LEMCO. (03 de Mayo de 2014). *Medición de las Propiedades Reológicas a Bajas Temperaturas* [Video]. YouTube. doi:<https://www.youtube.com/watch?v=rXMqNeQOjVQ>
- Lizcano, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Colombia: Escuela colombiana de ingeniería.
- Maxil Coyopotl, R., & Salinas Hernández, M. (s.f.). *ventajas y Desventajas del uso de polímeros en el Asfalto*. Universidad de las Américas. (Tesis de licenciatura), Puebla.
- McGennis, R., Shuler, S., & Bahía, H. (1998). *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE*. Kentucky: Asphalt institute.
- Minaya Gonzalez, S., & Ordóñez Huaman, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima.
- Minaya Gonzalez, S., & Ordóñez, H. A. (2003). *SUPERPAVE y el Diseño de Mezclas Asfálticas*. Universidad Nacional De Ingeniería, Lima.

- Morales Bravo, D. O. (2013). Zonificación de temperaturas para la evaluación y aplicación de mezclas asfálticas tocaron según la metodología superpave para el uso en Chile. Chile: (Tesis de Grado).
- Motamed, A., & Bahia, H. (2011). Influencia de la geometría de prueba, la temperatura, el nivel de tensión y la duración de la carga en las propiedades del aglomerante medidas con DSR (Vol. 23). *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Pinargote Mendiburo , K. A., & Ramos Luna, K. P. (2019). Control de calidad a cementos asfálticos. (Tesis de Licenciatura). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Polacco, G., Bertilincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Journal of Polymers*, 2831-2844.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., & Zanzotto, L. (2006). Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Current views on interface science and colloids*, 230-245.
- Polacco, G., Stastna, J., Vlachovicova, Z., Biondi, D., & Zanzotto, L. (2004). Temporary networks in polymer-modified asphalts. *Ingeniería y ciencia de polímeros*, 2185-2193.
- Rebelo, L., Sousa, J., & Abreu, A. (2014). Envejecimiento de ligantes asfálticos investigados con microscopía de fuerza atómica. 15-25.
- Reinke, G. (2000). Prepared discussion to mixing and compaction temperatures for superpave mixes (Vol. 70). *Asphalt Paving Technology*.
- Rubio Torres, E. S. (2018). Metodología para la construcción de mapas de temperatura basada en la influencia termo - topográfica y el grado de desempeño (pg) aplicada en la selección de cementos asfálticos (Tesis de Maestría). Morelia, Michoacán.
- Safwan A, K., Khafagy, M., & Saady, M. (2014). Desarrollo de grados de rendimiento de ligante asfáltico. *Soluciones Sustentables en Ingeniería y Construcción Estructural* (págs. 393-398). Bangkok: ResearchGate.
- Sandoval, I. (2017). Determinación de las temperaturas de mezclado y compactación mediante la viscosidad a corte cero. Congreso Mexicano del asfalto. ITAFAC México, Cancún.
- Sanz, A. H. (1999). Uso de asfalto tipo S.M.A. con viatop 66 en pavimento dentro del municipio de Naucalpan de Juárez (Tesis de grado). México: Instituto Tecnológico de la Construcción A.C.

- Secretaria de Infraestructura, C. y. (28 de Junio de 2018). Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Características de los materiales, págs. 1-9.
- Suresha Subbarao, N., & Vijayakumar, A. (22 de Febrero de 2021). Características químicas y reológicas de ligantes asfálticos envejecidos aceleradamente utilizando horno de laminación de película delgada. *Construcción y Materiales de Construcción*, 272.
- Transportes, S. d. (23 de Noviembre de 2022). Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV). *Métodos de muestreo y pruebas de materiales*, 1-2.
- U. Bahia, H., & A. Anderson, D. (1994). The pressure Aging Vessel PAV: A test to simulate rheological changes. American Society of testing Materials.
- Vila Romani, R. (2018). Generalidades. Caracterización química, física y reológica. Cementos asfálticos. (Conferencia), Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Visscher, J., Soenen, H., Vanelstraet, A., & Redelius, P. (2004). A comparison of the zero shear viscosity from oscillation tests and the repeated creep test. Eurasphalt and Eurobitume Congress.
- Whiteoak. (1990). Manual de betún de Shell. Surrey, UK.
- Xiangdao, H., Liang, B., Feipeng, X., Jiayu, W., & Wang, T. (2020). Caracterización del comportamiento de envejecimiento del asfalto y propiedades reológicas basadas en espectrofotometría. Characterizing asphalt aging behaviors and rheological properties based on spectrophotometry.
- Xu, S., Wang, Y., Zhang, C., & Wang, B. (2019). Propiedades físicas y características anti envejecimiento del asfalto modificado con polvo de nano-óxido de zinc (Vol. 224). *Construction and Building Materials*.
- Yener, E., & Hınıslıođlu, S. (2014). Efectos del tiempo de exposici3n y la temperatura en el ensayo de envejecimiento sobre las propiedades de los ligantes asfálticos. *En t. J. Civ. Estructura*, 112-124.
- Zahra , Q., Alaa, A., & Zaynab, Q. (2018). Impacto de las propiedades del asfalto de mezcla en caliente Superpave en su comportamiento de deformaci3n permanente. *Ingeniería Geotécnica y de Transporte*.