



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLAS DE HIDALGO**

---



**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

**Comparación de calidad de materiales  
asfálticos mediante la normativa de la  
SCT**

Tesis

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presenta

**CRUZ GERVACIO EMMA**

Asesor:

**DR. MARIO SALAZAR AMAYA**

Coasesor:

**DR. HORACIO DELGADO ALAMILLA**

Morelia, Michoacán. Abril del 2019





## TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS .....	V
INDICE DE TABLAS .....	VII
RESUMEN .....	IX
PALABRAS CLAVE .....	IX
ABSTRACT .....	X
OBJETIVO GENERAL .....	XI
OBJETIVO ESPECIFICO.....	XI
JUSTIFICACIÓN .....	XI
DEDICATORIAS .....	XII
AGRADECIMIENTOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1. ANTECEDENTES .....	3
1.1 ASFALTO.....	3
1.1.1 Antecedentes del asfalto.....	3
1.1.2 Componentes del asfalto. ....	3
1.1.3 Actualizaciones en la normatividad del asfalto .....	4
1.2 ASFALTO MODIFICADO.....	5
1.3 RAZONES PARA USAR LOS MODIFICADORES DE ASFALTOS. ....	6
1.3.1 Deformación permanente. ....	7
1.3.2 Roderas .....	9
1.3.3. Agrietamiento por fatiga.....	9



1.4 CLASIFICACIÓN DE AGENTES MODIFICADORES DE ACUERDO A LA PROPIEDAD QUE MANIPULAN. ....	10
1.4.1 Modificadores de reología.....	10
1.5 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS N·CMT·4·05·001/06.....	11
1.6 NORMATIVA PARA LA CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS N·CMT·4·05·002/06.....	14
1.6.1 Requisitos de calidad para cementos asfálticos modificados .....	15
1.7 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS GRADO PG N·CMT·4·05·004 VERSIÓN 2008.....	17
1.7.1 Grado de desempeño PG .....	17
1.7.2 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG .....	19
1.8 CALIDAD DE CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO DE DESEMPEÑO (PG) N·CMT·4·05·004 VERSIÓN 2018 .....	21
1.8.1 Requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) seleccionado.....	22
1.8.2 Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG).....	23
CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS .....	24
2.1 NORMA N·CMT·4·05·001/06 CALIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS. ....	24
2.1.1 Penetración en cementos y residuos asfálticos (M·MMP·4·05·006/00).....	24
2.1.2 Punto de reblandecimiento (M·MMP·4·05·009/00).....	25
2.1.3 Ductilidad de cementos (M·MMP·4·05·011/07) .....	26
2.2 NORMA N·CMT·4·05·002/06 CALIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.....	27
2.2.1 Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·024) .....	27
2.2.2 Recuperación elástica en ductilómetro M·MMP·4·05·026 .....	28



2.1.3 Separación de polímero M·MMP·4·05·022.....	29
2.3 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS GRADO PG N·CMT·4·05·004/08 .....	30
2.3.1 Método estándar para determinar la viscosidad del asfalto a temperaturas elevadas utilizando un viscosímetro rotacional ASTM D4402-15 .....	30
2.3.2 Método estándar para determinar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR) Condición original, RTFO, PAV ASTM D7175-15.....	31
2.3.3 Método estándar para determinar el efecto del aire y calor en una película de asfalto en movimiento (ensayo en horno rotatorio de película delgada. (RTFO) ASTM D2872-12.....	34
2.3.4 Practica estándar para el envejecimiento acelerado de un ligante asfáltico utilizando una vasija de envejecimiento a presión (PAV) ASTM D2872-12.....	36
2.3.5 Método estándar para determinar la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el reómetro de viga a flexión (BBR) ASTM D6648-08. ....	37
2.3.6 Densidad de materiales bituminosos semi-sólidos (método del picnómetro) ASTM D70-09.....	39
2.4 GRADO PG N·CMT·4·05·004/08 CREPP + N·CMT·4·05·004/18 .....	40
2.4.1. Recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR).....	41
CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	46
3.1. PROCESO DE INCORPORACION.....	46
3.1.1 Proceso de mezclado del ELVALOY-PPA.....	46
3.1.2 Proceso de mezclado de hule.....	48
3.2. EVALUACIÓN DE ACUERDO A LAS NORMAS N·CMT·4·05·001/06. Y N·CMT·4·05·002/06.....	48
3.2.1 Penetración a 25°C M·MMP·4·05·006. ....	52



3.2.2 Ductilidad a 25°C M·MMP·4·05·011 .....	52
3.2.3 Punto de reblandecimiento M·MMP·4·05·009 .....	53
3.2.4 Separación del polímero M·MMP·4·05·022 .....	54
3.2.5. Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·024) .....	54
3.2.6 Recuperación elástica en ductilómetro M·MMP·4·05·026 .....	55
CONCLUSIONES .....	56
3.3. EVALUACIÓN DE ACUERDO A NORMA N·CMT·4·05·004/08 .....	56
3.3.1 Viscosidad rotacional .....	59
3.3.2 DSR en condición original.....	60
3.3.3 Ángulo de fase .....	60
3.3.4 Módulo de corte dinámico ( $G^*$ ) .....	61
3.3.5 Cambio de masa después de envejecimiento (RTFO) .....	61
3.3.6 Reómetro de corte dinámico después de RTFO.....	62
3.3.7 Ángulo de fase después de RTFO.....	62
3.3.8 Módulo de corte dinámico después de RTFO.....	63
3.3.9 Corte dinámico después de PAV .....	64
3.3.10 Ángulo de fase después de PAV. ....	64
3.3.11 Curva de la pendiente del ensayo de BBR .....	65
3.3.12 Curva rigidez-tiempo del ensayo de BBR .....	66
3.3.13 Grado PG por cada porcentaje de asfalto.....	66
CONCLUSIONES .....	68
3.4. EVALUACIÓN DE ACUERDO A NORMA CREPP + N·CMT·4·05·004/18.....	69
CONCLUSIONES .....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	71



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Uso de los modificadores de asfalto .....	6
Figura 1. 2 Deformación de las carpetas asfálticas.....	7
Figura 1. 3 Deformación permanente de un pavimento asfáltico .....	8
Figura 1. 4 Agrietamiento por fatiga .....	10
Figura 1. 5 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica. ....	13
Figura 1. 6 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG.....	17
Figura 2. 1 Penetrometro para la prueba de penetración.....	25
Figura 2. 2 Equipo de ensayo para punto de reblandecimiento .....	26
Figura 2. 5 Ductilidad y moldes .....	28
Figura 2. 6 Viscosímetro rotacional.....	30
Figura 2. 7 Comportamiento elástico y viscoso.....	32
Figura 2. 8 Importancia de $\delta$ en la reología.....	33
Figura 2. 9 Reómetro de corte dinámico. ....	34



Figura 2. 10 Horno rotatorio de película delgada (RTFO) .....	35
Figura 2. 11 Componente del (RTFO).....	36
Figura 2. 12 Vasija de envejecimiento a presión (PAV) y sus componentes .....	37
Figura 2. 13 Equipo BBR.....	38
Figura 2. 14 Cambio de masa .....	39
Figura 2. 15 Ciclo 1, ensayo MSCR .....	42
Figura 2. 16 Parámetro de conformidad vs. Porcentaje de recuperación .....	43
Figura 3. 1 Adición y remezclado .....	47
Figura 3. 2 Manejabilidad de los diferentes asfaltos .....	48
Figura 3. 3 Penetración a 25°C.....	52
Figura 3. 4 Ductilidad a 25°C .....	53
Figura 3. 5 Punto de reblandecimiento .....	53
Figura 3. 6 Separación del polímero .....	54
Figura 3. 7 Recuperación elástica por torsión .....	55
Figura 3. 8 Recuperación elástica en ductilómetro .....	55
Figura 3. 9 Viscosidad rotacional .....	59
Figura 3. 10 Corte dinámico en condición original .....	60
Figura 3. 11 Curva de ángulo de fase .....	61
Figura 3. 12 Curva de módulo de corte dinámico.....	61
Figura 3. 13 Cambio de masa después de envejecimiento (RTFO).....	62
Figura 3. 14 Corte dinámico después de RTFO.....	62
Figura 3. 15 Angulo de fase después de RTFO .....	63
Figura 3. 16 Módulo de corte dinámico después de rtfo .....	63
Figura 3. 17Corte dinámico después de pav.....	64
Figura 3. 18 Corte dinámico en condición original .....	65
Figura 3. 19 Pendiente .....	65
Figura 3. 20 Rigidez .....	66
Figura 3. 21 Variación del PG con los diferentes porcentajes de aditivo .....	66
Figura 3. 22 Esfuerzo 0.1 kpa .....	70





## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Clasificación de los materiales asfálticos .....	11
Tabla 1. 2 clasificación de los cementos asfáltico según su viscosidad dinámica a 60 °C	12
Tabla 1. 3 Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C .....	13
Tabla 1. 4 Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 Y AC-20 modificados ...	16
Tabla 1. 5 Ajustes del grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad de tránsito esperada y con la velocidad de operación .....	19
Tabla 1. 6 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG .....	20
Tabla 1. 7 Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación.....	22
Tabla 1. 8 Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste.....	23
Tabla 2. 1 Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados .....	24
Tabla 2. 2 Tnsayos en el DSR ASTM D7175-15.....	31
Tabla 2. 3 Temperatura de densidad .....	40
Tabla 2. 4 Grado de desempeño, MSCR .....	43
Tabla 2. 5 Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste.....	44
Tabla 3. 1 Polímero y porcentaje .....	46
Tabla 3. 2 Propiedades físicas EKBÉ .....	49
Tabla 3. 3 Propiedades físicas Elvaloy 1.1%/0.15%PPA .....	49
Tabla 3. 4 Propiedades físicas Elvaloy 1.2%/0.10PPA .....	50
Tabla 3. 5 Propiedades físicas Hule –Ret .....	50
Tabla 3. 6 Propiedades físicas SBS.....	51
Tabla 3. 7 Grado PG EKBÉ.....	56
Tabla 3. 9 Grado PG Elvaloy 1.2% PPA0.10 .....	58
Tabla 3. 10 Grado pg Hule-Ret100-4% .....	58



Tabla 3. 11 Grado PG SBS .....	59
Tabla 3. 12 Asfaltos por grado PG .....	67



## RESUMEN

La normativa actual de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) contempla tres métodos de prueba la evaluación de los ligantes asfálticos modificados para su uso en pavimentos.

El presente estudio tiene como objetivo específico evaluar la normativa vigente de la SCT y definir cuál de estos métodos de prueba propuestos es el más adecuado para la evaluación de los asfaltos modificados.

Para la evaluación de los ensayos se estableció un asfalto de referencia base, el cual corresponde a un asfalto EKBE (PG 64-16), partir de este asfalto base se adicionaron distintos tipos de productos químicos para la modificación del asfalto. Para las dos primeras modificaciones del asfalto se utilizó un latex, el cual se adiciono en dos concentraciones distintas, 1.1ELVALOY/0.15PPA (PG 82-16), 1.2ELVALOY/0.10PPA (PG 76-16). Para la modificación del tercer asfalto utilizado se empleó un 4% de Hule molido de llanta. (PG 7616). El cuarto asfalto modificado fue un PG 76-16 con polímero tipo SBS, el cual corresponde a un asfalto comercial y únicamente se utilizó como un parámetro de referencia.

Se realizaron ensayos de Penetración, Recuperación elástica por torsión, Punto de reblandecimiento, Ductilidad, Recuperación elástica en ductilómetro y separación de polímero, conforme a la norma N·CMT·4·05·001/06 y N·CMT·4·05·002/06 para conocer las propiedades físicas de los ligantes asfálticos modificados. Para la evaluación reológica de los ligantes asfálticos se utilizó la norma N·CMT·4·05·004/08 la cual contempla los ensayos de Viscosidad rotacional, corte dinámico en condición original, RTFO y PAV, envejecimiento a corto plazo de la película delgada en horno rotatorio RTFO, envejecimiento a largo plazo con la olla de presión PAV, viga a flexión BBR. También se analizó el método de prueba N·CMT·4·05·004/018 el cual refiere al ensayo de Creep, para conocer la condición de trabajo a las que el asfalto será sometido en el pavimento.

Se comprobó que al evaluar los asfaltos con los diferentes porcentajes de polímero no parece haber diferencias significativas en cuanto a su grado PG sin embargo en su comportamiento físico de los materiales asfálticos modificados, se observa que el aumento del 0.15% de PPA lleva al asfalto a un Grado PG superior.

## PALABRAS CLAVE

Mezclas asfálticas, tensión indirecta, deformación permanente, aditivo promotor de adherencia.



## ABSTRACT

The current regulations of the Ministry of Communications and Transportation (SCT) includes test methods, evaluation, asphalt binders modified for use in pavements. The present study has as a specific objective to evaluate the current regulations of the SCT and to define the proposed test methods is more suitable for the evaluation of modified asphalts. For the evaluation of the tests a base reference asphalt is established, which corresponds to an EKBE asphalt (PG 64-16), from this asphalt is based on the types of chemical products for the modification of the asphalt. For the first two modifications of the asphalt are used in a latex, which is fulfilled in two different options, 1.1ELVALOY / 0.15PPA (PG 82-16), 1.2ELVALOY / 0.10PPA (PG 76-16). For the modification of the third assault used was used in a 4% of rum milled rubber. (PG 76-16). The fourth modified asphalt was added to a SBS type polymer (PG 76-16). Which corresponds to a commercial asphalt and has become a reference parameter.

Penetration tests, elastic torsional recovery, softening point, ductility, elastic recovery in ductilometer, according to the norm N · CMT · 4 · 05 · 002/06 were performed to know the physical properties of the modified asphalt binders. For the rheological evaluation of asphalt binders, they are used for the standard N · CMT · 4 · 05 · 004/08 which contemplates the tests of rotational viscosity, dynamic cutting in original condition, RTFO and PAV, short-term thin film in RTFO rotary kiln, long term with the PAV pressure cooker, BBR beam. The test method N · CMT · 4 · 05 · 004/018 is also analyzed, which refers to the Creep test, to know the working condition so that the subject becomes the pavement.

It is verified that when evaluating the asphalts with the different percentages of them, it does not seem to have had the differences in their grade. However, the state of the modified asphalt materials is not taken into account, it is observed that the increase of 0.15% of PPA leads the asphalt to a higher PG Degree.



## **OBJETIVO GENERAL**

Comparar las propiedades de diferentes asfaltos modificados clasificados por medio de tres normativas de la SCT

## **OBJETIVO ESPECIFICO**

- Evaluar las propiedades de los asfaltos modificados de acuerdo a la norma N CMT 4 05 002/06.
- Evaluar las propiedades de los asfaltos de acuerdo a la norma N CMT 4 05 004/08.
- Evaluar las propiedades de los asfaltos de acuerdo a la norma N CMT 4 05 004/18.
- Comparar las propiedades obtenidas en ambas especificaciones

## **JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto nace de la necesidad de conocer las diferentes especificaciones para clasificar los materiales asfálticos modificados en México y poder establecer cual normativa es la más adecuada.

Cuántas normas de asfaltos hay en la página de la SCT, que tipo de clasificación (Viscosidad, PG, PG+Creep), se tiene dudas de cuál de estas se debe utilizar en una obra, No se conocen algunos de los ensayos (PG, Creep), No están las normas en la página de la SCT.



## DEDICATORIAS

*A mi Dios.*

*Por todo lo que he vivido, por las personas que me han enseñado, por el entorno en el que hasta ahora me ha permitido estar, por las tristezas, las alegrías, porque me has dado la dicha de estar aquí. Por el encuentro de mi propósito, por ayudarme a soltar y a no quedarme en el pasado, y a aproximarme a lo que tú desea para mí.*

*A mis muy queridos padres, las personas que nunca han medido dadas:*

*Mi padre Fernando Cruz Gervacio y mi madre Emma Gervacio Vanegas por ser las personas que más admiro y de las que cada día más me siento orgullosa, por ser mi motor, el modelo de fuerza y voluntad que ha guiado el sentido de mi vida y estar siempre presentes en mis triunfos y fracasos. ¡Los quiero mucho!*

*A mis hermanos:*

*Por motivarme a alcanzar nuevos sueños, apoyarme y respetar mis decisiones, por siempre tenerme presente que nuestras vidas año con año van tomando rumbos diferentes y que a pesar de la distancia en todo momento están presentes nuestros lazos de hermandad sin que nada ni nadie interfieran en ellos.*



## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiese sido posible sin la cooperación de todas y cada una de las personas que apoyaron desinteresadamente; y muchas de las cuales han sido un soporte y compañía indispensable.

Agradezco a mi familia, porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mí se depositó y con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré agradecida.

A la U.M.S.N.H, orgullosamente mi ALMA MATER:

A la gran institución que dio forma a una nueva persona, formando carácter, principios y valores por medio de sus profesores. A sí como a los profesores de la carrera de Ingeniería Civil por haber compartido conocimientos y armas para defenderme en el mundo real, que me enseñaron a cumplir y cumplir con buenas respuestas, fundamentadas en el conocimiento y el resultado de su experiencia propia. Gracias maestros.

A mi asesor Dr. Mario Salazar Amaya por todo el apoyo y grandes intenciones desde que me acerqué al Laboratorio de Materiales, desde sus asesorías y ahora como mi asesor.

De manera especial agradecer al Dr. Horacio Delgado Alamilla líder del área de Mecánica de Asfaltos y Mezclas Asfálticas en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por su apoyo incondicional que me brindo desde el primer verano de investigación por su paciencia, confianza y sobre todo por el tiempo y esfuerzo que ha dedicado en el desarrollo de esta investigación; muchas gracias.

A todo el personal del Laboratorio de Infraestructura: en especial al Ing. Aldo Salazar Rivera por su amabilidad y disponibilidad durante mi estancia en el laboratorio, durante las cuales tuve el soporte profesional y logístico para alcanzar los objetivos perseguidos.

Al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por permitirme desarrollar mi investigación dentro de su comunidad y su gran prestigio ampliamente reconocido.

Una persona que toma una parte primordial en esta tesis es el Dr. Rafael Soto Espitia gracias por su siempre atenta y efectiva colaboración por los consejos y ayuda que me ha dado en todo momento sin esperar mérito alguno.



A la familia Cruz Moya por su apoyo incondicional en todo momento y por dejarme formar parte de su familia durante mi estancia en Querétaro .

Y por último y no menos importante a mis amigos Imer, Gerardo, Daniel, Said, Jorge, Tania, Carmen, Karen, Melisa, David, José Pablo, Eduardo, Yonathan que me han acompañado a lo largo de mi carrera profesional y no solamente en ella sino que también en mi vida. Gracias por estar en los mejores y por qué no también peores momentos, les agradezco de corazón su amistad.





## INTRODUCCIÓN

El aumento a las exigencias a las cuales se someten los recubrimientos asfálticos en las carreteras ha forzado a las compañías constructoras y a las instituciones responsables de la construcción y mantenimiento de la red vial, a mejorar el comportamiento de los mismos para tratar de adecuarse a las demandas actuales de la red vial, a mejorar el comportamiento de los mismos para tratar de adecuarse a las demandas actuales del tráfico. Esta adaptación se ha ido llevando a cabo mediante una mejor selección de los materiales, un mejor diseño de las mezclas y un mejoramiento general en las técnicas de fabricación, puesta en obra y compactación de las mezclas.

Los ligantes por usar un término más genérico que incluya a los asfaltos sintéticos, los de origen natural, etc. Que son los responsables de la cohesión de la mezcla, han contribuido de forma importante al mejoramiento global del comportamiento de las mezclas asfálticas. Pero es fácil entender, que las investigaciones encaminadas a lograr unas mejores propiedades mecánicas, en un amplio rango de temperaturas son limitadas, cualquiera que sea la evolución de los procedimientos de fabricación que se empleen.

Por otra parte, los problemas difíciles concernientes a las propiedades de los materiales, han sido afortunadamente resueltos mediante la puesta en obra de materiales plásticos. Las investigaciones se han encaminado por la vida de juntar dos productos que unan sus ventajas manteniendo un nivel de costos aceptables para la construcción de carreteras. Estos productos son los ligantes tradicionales y los polímeros.

Los ligantes modificados existentes han sido usados cuando las necesidades de determinadas propiedades están por encima de aspectos meramente económicos. Estos casos se refieren en concreto a los recubrimientos superficiales, a los recubrimientos especiales, a las juntas cuando se busca estanqueidad etc.

En lo que concierne al aspecto histórico de la modificación de ligantes hidrocarbonados con polímero, la idea de modificar asfalto con polímero se remonta a 1960 en Italia, Francia, Alemania etc. Donde se llevaron a cabo los primeros proyectos de prueba. Anteriormente desde 1840 se había mezclado asfalto con polímero para diferentes aplicaciones específicas.

Posteriormente se realizan investigaciones encaminadas a determinar la incidencia sobre el producto final de diferentes aspectos como el tipo de polímero, dosificación y método de producción.

Los materiales asfálticos tienen diversas aplicaciones en las vías terrestres, entre ellas, la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizantes, ya sea para aglutinar los materiales pétreos, ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub-bases.

En el primer capítulo se describen conceptos fundamentales y antecedentes del asfalto, ligantes asfálticos, la reología, la viscoelasticidad, a que se refiere con el ELVALOY 4170 empleado en la experimentación, y la caracterización del grado PG, esta última muy importante, ya que los resultados al final es la determinación del grado PG.



En el capítulo dos se describen las actividades realizadas, como la incorporación del Elvaloy 4170 Recuperación elástica por torsión, Punto de reblandecimiento, Densidad específica del asfalto, Viscosidad rotacional, Ensayo reológico de corte dinámico en condición original, Ensayo reológico de corte dinámico en condición RTFO, Ensayo reológico de corte dinámico en condición PAV, Ensayo de la película delgada en horno rotatorio RTFO, Ensayo de envejecimiento con olla de presión PAV, y Ensayo con el reómetro de viga a flexión BBR.



## CAPITULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 ASFALTO

#### 1.1.1 Antecedentes del asfalto

Según información de la SCT N-CMT-4-05-001 (2008), inicialmente en México, alrededor de 1930, el asfalto se clasificó por medio del Grado Penetración; avanzando después en 1990 a la especificación de Grado Viscosidad (AC). Los principales parámetros técnicos que propiciaron el uso del AC fueron los problemas causados por el amplio rango de viscosidad que presentan los asfaltos Grado Penetración, además que la temperatura de 135 °C especificada en los AC se considera un promedio para las operaciones de transporte, almacenamiento y construcción de carpetas asfálticas, a diferencia de los 60 °C especificados en la previa caracterización.

Las dos caracterizaciones para cementos asfálticos mencionadas previamente presentan el inconveniente de no correlacionar totalmente el comportamiento a las condiciones de carga-tiempo a las cuales son sometidos estos productos en las modernas supercarreteras de altas especificaciones para el tráfico vehicular de varios ejes de transmisión. Debido a estas carencias técnicas en el método Superpave también se incluyen nuevas especificaciones de asfalto, llamadas Grado PG, adoptadas posteriormente por la AASHTO y el AI. Estas especificaciones, mencionan se pueden aplicar en asfaltos convencionales y modificados.

La normatividad americana cuenta con la especificación ASTM D6373, AASHTO M320 y AASHTO MP1 para la clasificación del asfalto por Grado PG, siendo la ASTM D6373 (2013) la última versión de la clasificación y en la que se basará el presente estudio. De la misma manera, la normatividad vigente en México se basa en la SCT N-CMT-4-05-004 (2008).

El sistema de clasificación Grado PG es la selección del ligante asfáltico indicado para el desempeño del pavimento deseado en términos de los tres modos de falla de un pavimento: deformación permanente (roderas), agrietamiento por fatiga y agrietamiento por baja temperatura. Esta caracterización mide las propiedades fundamentales (esfuerzos y deformaciones) del ligante en varias etapas y condiciones (temperaturas de servicio y envejecimiento del ligante) a lo largo de la vida útil esperada del pavimento.

#### 1.1.2 Componentes del asfalto.

El asfalto es un componente del petróleo; motivo por el que, debido a la naturaleza del tema a tratar, es importante hablar brevemente de las características de este último, para después tratar con claridad el tema.

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida”



Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub-bases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras de drenaje, entre otras. Se clasifican en cementos asfálticos, asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, respectiva dictada por la SCT y se detalla a continuación.” En este caso en particular solo se hace mención de existencia de los productos asfálticos, y rebajados, pues no es parte del tema en desarrollo, enfocando únicamente a los cementos asfálticos.

El asfalto es un componente natural del petróleo, en el que existe la disolución. Para obtener el asfalto el petróleo crudo se somete a destilación, de esta forma se separan sus diversas fracciones y se recupera, entre otras sustancias, el asfalto. Mediante procesos similares la naturaleza da origen también a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales este se encuentra prácticamente libre de materias extrañas, mientras que en otros casos está mezclado con cantidades variables minerales, agua y otras sustancias.

Por su versatilidad y fácil manejo es ampliamente utilizado en diferentes ramas de la construcción. Se emplea significativamente en la construcción de carpetas, superficies de rodamiento, revestimiento de obras hidráulicas, impermeabilización de edificaciones etc.

Para el ingeniero el asfalto es un material de particular interés porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia práctica que da flexibilidad controlable a las mezclas de agregados pétreos con las que se combinan usualmente.

### **1.1.3 Actualizaciones en la normatividad del asfalto.**

Según información de la SCT N-CMT-4-05-001 (2006), inicialmente en México, alrededor de 1930, el asfalto se clasificó por medio del Grado Penetración; avanzando después en 1990 a la especificación de Grado Viscosidad (AC). Los principales parámetros técnicos que propiciaron el uso del C fueron los problemas causados por el amplio rango de viscosidad que presentan los asfaltos Grado Penetración, además que la temperatura de 135 °C especificada en los AC se considera un promedio para las operaciones de transporte, almacenamiento y construcción de carpetas asfálticas, a diferencia de los 60 °C especificados en la previa caracterización. Debido a estas carencias técnicas en el método Superpave también se incluyen nuevas especificaciones de asfalto, llamadas Grado PG, adoptadas posteriormente por la AASHTO y el AI. Estas especificaciones, mencionan Kennedy et. Al (1994), se pueden aplicar en asfaltos convencionales y modificados.

El sistema de clasificación Grado PG es la selección del ligante asfáltico indicado para el desempeño del pavimento deseado en términos de los tres modos de falla de un pavimento: deformación permanente (roderas), agrietamiento por fatiga y agrietamiento por baja temperatura. Esta caracterización mide las propiedades fundamentales (esfuerzos y deformaciones) del ligante en varias etapas y condiciones (temperaturas de servicio y envejecimiento del ligante) a lo largo de la vida útil esperada del pavimento.



## 1.2 ASFALTO MODIFICADO

Como se mencionó anteriormente, los productos asfálticos se han visto afectados por una disminución en su calidad. Además, en respuesta a la cada vez mayor necesidad de contar con productos que tengan un mejor desempeño bajo la acción del tránsito vehicular y de los distintos factores ambientales, se ha desarrollado procesos y fórmulas que permiten la fabricación de asfaltos de alto rendimiento, esto se logró mediante la modificación de los asfaltos.

La construcción de pavimentos flexibles está limitada a tres tipos no convencionales de asfaltos:

- *Asfalto modificado:*

Un asfalto modificado como lo indica su nombre, es un asfalto al que se le adiciona un agente que modifica sus características iniciales, las cuales pueden ser entre otras, la viscosidad, dureza, elasticidad, etc., con lo que se logra facultar al concreto hidráulico con características necesarias para resistir los esfuerzos, los agentes climáticos, y las condiciones de trabajo que propician su desgaste, el cual puede ser prematuro. Más adelante se especificarán las características que se modifican del asfalto y el objetivo que se persigue con esto. Los agentes que se emplean son polímero, látex y hule molido retenido en la malla #100.

- *Asfaltos con aditivos:*

Los aditivos para asfalto son agentes modificadores, tienen las mismas funciones que los modificadores; por lo que es equivalente a nombrar aditivos a modificadores, como nos referiremos indistintamente en lo que continúan. Aunque un asfalto modificado se diferencia de un asfalto con aditivo, por el momento que en el que adiciona cualquiera de estos a mezcla. Un asfalto modificado es aquel en el que el modificador se agregó al asfalto previo a realizar la mezcla, mientras que un aditivo puede adicionarse de esta forma o bien en el mismo momento de realizarla. En este caso los aditivos son fibras, aditivos líquidos químicos y el óxido de cal.

- *Asfaltos especiales:*

Estos son asfaltos que se obtienen mediante un proceso de refinación especial. El uso de estos asfaltos es aún más reducido que el uso de agentes modificadores; los asfaltos especiales que se producen son los asfaltos duros, asfaltos pigmentados y el asfalto multigrado.

Es importante remarcar la importancia de conceptuar, por agente modificador, a todo aquel producto que se adicione al asfalto para modificar sus propiedades o su costo; desde este punto de vista, *el término aditivo es equivalente al término modificador.*

Como ya se hizo mención, en nuestro país diverso a factores no se ha desarrollado de forma importante el uso de los asfaltos modificados en la construcción de vías de comunicación y aunque el uso de estos va en aumento no se compara con el uso tradicional del asfalto común. Estudios realizados sobre el empleo de asfaltos modificados arrojan resultados que se muestran en la Figura 1.1

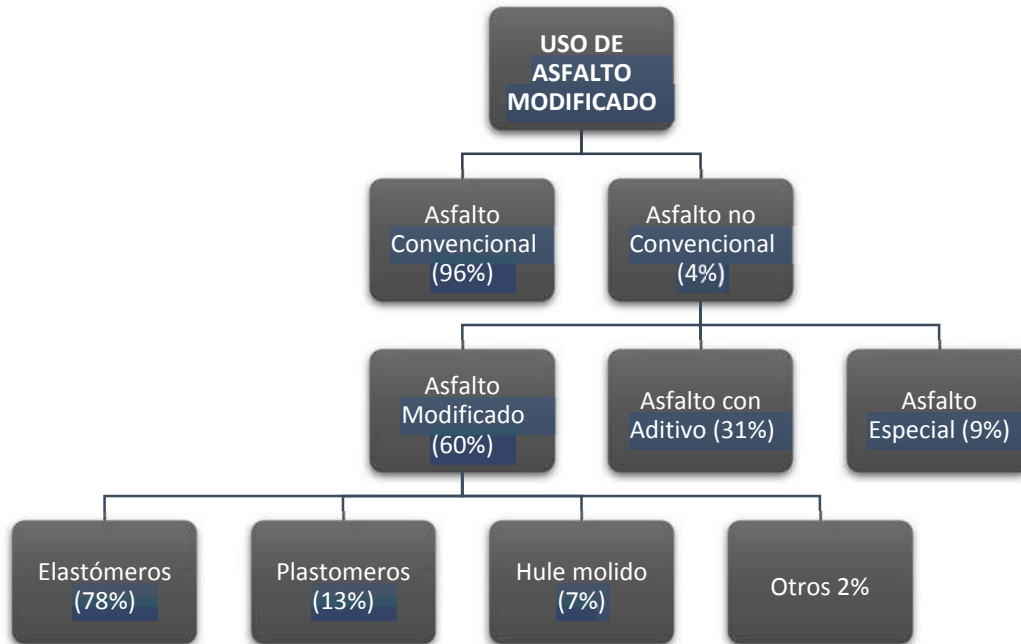


Figura 1. 1 Uso de los modificadores de asfalto

### 1.3 RAZONES PARA USAR LOS MODIFICADORES DE ASFALTOS.

Todas estas mezclas presentan distintas propiedades reológicas, dependiendo de las propiedades del ligante en sí, la proporción de los diferentes componentes, la distribución de tamaño de partículas, la angularidad de los agregados y la densidad. Las propiedades de estas mezclas asfálticas también variarán con el tiempo debido al envejecimiento del ligante.

Se tiene perfectamente bien establecido, que las vías terrestres se proyectan y se construyen, para que estén en servicio por un determinado número de años como mínimo, a este periodo se le conoce como horizonte de proyecto o vida útil de la obra. Al concluir este periodo de tiempo, los caminos se abandonan, se rescatan o se reconstruyen con objeto de aumentar su servicio por más tiempo, que es en general lo que sucede.

Al estar en operación, una obra se deteriora gradualmente y presenta diferentes condiciones de servicio a través de los años. Los deterioros pueden ser pequeños en un principio; pero empeoran con el transcurso del tiempo hasta ser considerables acelerando la falla de la vía; por esto, una obra requiere de mantenimiento o conservación, para que de esta forma asegurar, por lo menos, su vida útil de proyecto y proporcionar un servicio adecuado.

El deterioro se observa y se califica con un valor del 1 al 5, llamado índice de servicio; cuando una obra comienza a funcionar, recién construida, debe tener una calificación de 4.0 a 4.5, la cual disminuye mediante pasa el tiempo.



Cuando un camino de primer orden o autopista llega a un índice de servicio de 2.5 o 2, uno de segundo orden, el tránsito tiene varios problemas, y la comodidad del viaje llega al punto mínimo. En este momento, la obra alcanza su falla funcional, si el camino sigue en servicio, logra la falla estructural y prácticamente ya no puede haber tránsito. Debido a un mal diseño de la estructura en cuanto a los materiales o sus espesores, o a que no se pronosticó el tránsito en forma adecuada, una obra puede llegar a la falla estructural al estar prácticamente destruida antes de terminar la vida útil del proyecto, sin que quizás haya habido falla funcional, pues el deterioro habría sido rápido.

Para que una obra deteriorada no llegue con el tiempo a la falla estructural, es necesario rehabilitar la vía cuando alcance la falla funcional y su calificación sea de 2 para los caminos secundarios o de 2.5 para los de primer orden y especiales.

Desde el punto de vista mecanicista, existen dos principales criterios de falla para los materiales bituminosos: deformaciones permanentes y agrietamiento por fatiga.

### 1.3.1 Deformación permanente.

Una de las grandes diferencias entre una carpeta rígida, carpetas de concreto hidráulico, y una carpeta flexible, es la forma en que cada una de ellas absorbe y transmite las cargas a las capas subyacentes del pavimento. Pues es sabido que una carpeta rígida absorbe las cargas de manera distribuida, debido a su carácter de material rígido, propiedad con la que no cuenta una carpeta de asfalto, pues debido a su naturaleza, una carpeta asfáltica recibe la carga de forma directa, se deforma y la transmite en forma distribuida a la capa inferior. En la Figura 1.2 se muestra, de forma esquemática, del lado izquierdo la deformación que presenta una carpeta asfáltica, mientras que en el lado derecho la carpeta rígida no presenta deformación.

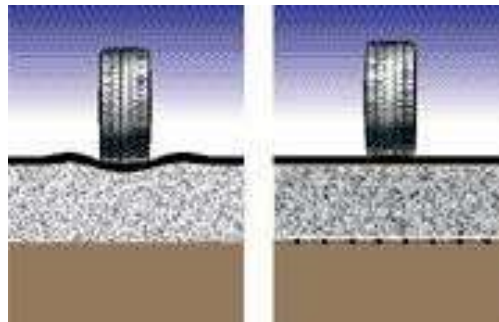


Figura 1. 2 Deformación de las carpetas asfálticas

Esta característica de las carpetas asfálticas es un gran inconveniente, la deformación de la carpeta asfáltica está en función de la zona en que se esté localizada, específicamente del clima o de la temperatura ambiental; de la rigidez de la misma carpeta; del tipo de tránsito que circule por el camino, pues obviamente las cargas mayores producen una deformación proporcional a ellas; y el tiempo de acción de estas cargas, en los sitios donde se presenta un tráfico lento, o bien en estacionamientos, las cargas actúan por tiempos más prolongados que en los que se tiene una circulación fluida.



El asfalto es un material que puede ser considerado elástico – lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a

El problema de las deformaciones es significativo cuando éstas llegan a ser permanentes, transmitidas a las capas inferiores del pavimento, Figura 1.3 pues con esto bien se puede dar inicio a la desintegración de la carpeta. Evitar la deformación permanente representa un gran dilema, pues al tratar de evitarlas por medio de una carpeta asfáltica más rígida se corre el riesgo que también sea demasiado frágil; por otra parte, una carpeta demasiado flexible acelera la presencia de deformaciones permanentes, además de que se presenta el riesgo de que los agregados de la capa inferior perforen a la carpeta. En forma sencilla, si el asfalto no tiene la flexibilidad suficiente para regresar a su posición original después de aplicada la carga, o si es demasiado rígido este fenómeno ocasionará fracturas permanentes en la superficie de rodamiento.

La deformación permanente se produce en el pavimento flexible cuando se acumula deformación plástica, con cargas repetidas a altas temperaturas comprendidas entre 40°C y 65°C, (mayores al punto de reblandecimiento del asfalto), como se mencionó anteriormente es favorecida por cargas altas y periodos lentos o prolongados de su aplicación. Los factores que favorecen a la aparición de la deformación permanente son las altas presiones de inflado de las llantas de los vehículos, aunque esto no depende del proyectista; un alto o bajo contenido de asfalto en la mezcla; el uso de agregados de forma alargada y redonda, además de la afinidad del pétreo a la humedad

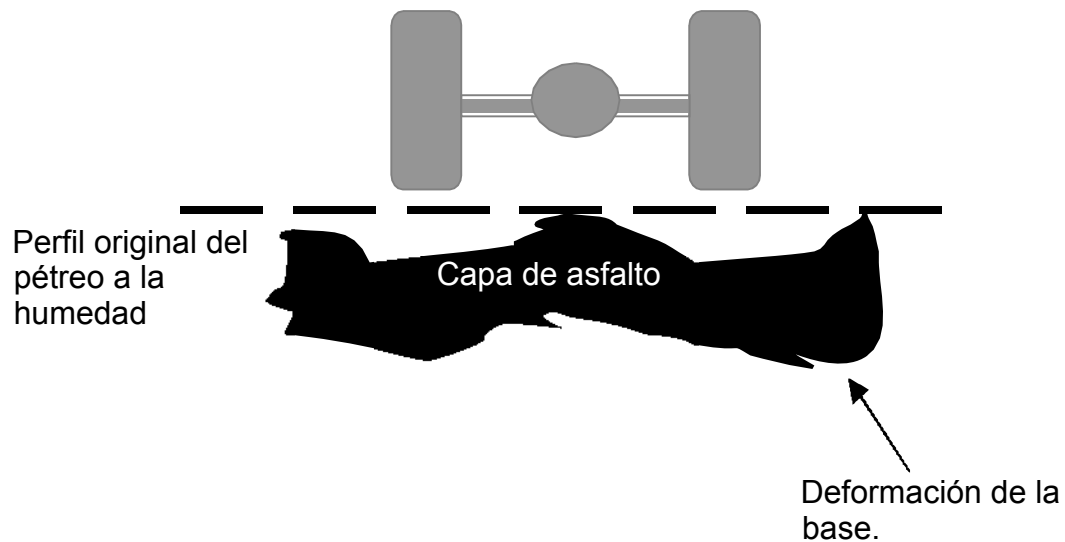


Figura 1. 3 Deformación permanente de un pavimento asfáltico

Otro fenómeno que se presenta, similar a la deformación permanente es el de agrietamiento por baja temperatura, este se presenta cuando el asfalto es demasiado rígido, debido a que presenta una elasticidad demasiado baja, lo que propicia que el asfalto se vea sujeto a esfuerzos de tensión antes de recibir alguna carga.





### **1.3.2 Roderas**

Este tipo de roderas son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto (Figura 0-1). Si bien los materiales duros pueden reducir parcialmente este tipo de roderas, es considerado un problema estructural más que de los materiales en sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. Puede más bien ser causado por el inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores más que en las capas de asfalto.

Las roderas de una mezcla débil ocurren típicamente durante el verano, bajo temperaturas altas del pavimento. Mientras esto podría sugerir que las roderas del cemento asfáltico son un problema causado por el sol, es más correcto pensar que son una combinación entre la resistencia de los agregados minerales y el cemento asfáltico.

Las roderas son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento de las mezclas es no sólo utilizar cemento asfáltico más duro, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento. Así, cuando se aplique la carga, el cemento asfáltico actuará como una banda de goma y volverá a su posición original en lugar de deformarse.

Otra manera de generar cortes de fuerza en las mezclas asfálticas es, seleccionando un agregado que tenga un alto grado de fricción interna, uno que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula.

Cuando se aplica una carga a una mezcla, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que fungen más como una sola, larga y elástica piedra. Como en el cemento asfáltico, los agregados actuarán como una banda de goma que volverá a su forma original cuando desaparezca la carga. De esta forma, no se acumula una deformación permanente.

### **1.3.3. Agrietamiento por fatiga**

Aunque generalmente una carga simple no genera grietas en el pavimento, las repeticiones de carga pueden inducir agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas, causan la formación de microgrietas.

Estas microgrietas acumuladas con la repetición de cargas pueden generar macrogrietas visibles. Este proceso es llamado fatiga. Un signo temprano de agrietamiento por fatiga son los rompimientos intermitentes longitudinales en las huellas de las llantas del tránsito. El rompimiento por fatiga es progresivo, ya que en algún punto los rompimientos iniciales se unen, causando más rompimientos. Al avanzado rompimiento por fatiga se le conoce como rompimiento de lagarto o piel de cocodrilo. En casos extremos, se presentan deformaciones cuando parte de la carpeta es desalojada por el tránsito.

El rompimiento por fatiga es causado por numerosos factores que ocurren en forma simultánea. Entre ellos, las cargas pesadas repetidas; deflexiones delgadas bajo ruedas pesadas de carga; deflexiones altas aunadas a la tensión horizontal en la superficie de la capa de asfalto y mal drenaje, generado por una construcción pobre y un mal diseño del pavimento.



Frecuentemente, el rompimiento por fatiga es meramente un signo de que el pavimento ha sobrepasado el número de aplicaciones de carga para el cual fue diseñado y en este caso el pavimento sólo necesitará una rehabilitación planificada. Asumiendo que el rompimiento por fatiga se dé después del tiempo de diseño, debe considerarse una progresión natural de la estrategia de diseño del pavimento. Si el rompimiento ocurre mucho antes de lo esperado, puede ser un signo de que las cargas del tránsito fueron sobrestimadas.

Consecuentemente, los mejores consejos para prevenir el rompimiento por fatiga son: un diseño adecuado de la cantidad de cargas pesadas, mantener la subrasante seca, utilizar pavimentos más gruesos, utilizar materiales de pavimentación no susceptibles a la humedad, y utilizar mezclas asfálticas elásticas que soporten las deflexiones normales. La selección de materiales elásticos depende estrictamente del diseño y la selección de los materiales.

Las mezclas asfálticas deben tener la suficiente fuerza para soportar la tensión aplicada a la base de la capa de asfalto y ser lo suficientemente elásticas para soportar la aplicación de carga repetida sin romperse. Además, la mezcla asfáltica debe diseñarse para que se comporte como un material elástico cuando se carga a tensión y se sobreponga al rompimiento por fatiga. Esto está acompañado de un límite en las propiedades de dureza del cemento asfáltico, mientras el comportamiento a tensión de las mezclas asfálticas está fuertemente influenciado por el cemento asfáltico.

En efecto, los asfaltos blandos tienen mejores propiedades con respecto al rompimiento por fatiga que los asfaltos duros.



Figura 1. 4 Agrietamiento por fatiga

## 1.4 CLASIFICACIÓN DE AGENTES MODIFICADORES DE ACUERDO A LA PROPIEDAD QUE MANIPULAN.

### 1.4.1 Modificador es de reología.

Los modificadores de reología están constituidos por un grupo de aditivos constituidos por **polímeros**, El término "**POLÍMERO**" se refiere a una molécula larga creada por una reacción química de muchas (poli) pequeñas moléculas (monómeros), que una con otra forman largas cadenas. Las propiedades físicas de un polímero se determinan por la secuencia y la estructura química de los monómeros que lo conforman.



Es muy importante aclarar los motivos por los que es importante entender el término reología. La reología es la rama de la mecánica que se encarga del estudio de las causas del comportamiento de los fluidos no Newtonianos, es decir aquellos que presentan una viscosidad elevada, más específicamente de los esfuerzos que producen el flujo de estos materiales.

En la actualidad, se realizan estudios arduos para comprender las causas que producen el comportamiento hidráulico de estos fluidos, es de gran interés científico y tecnológico incrementar el conocimiento respecto a este tema.

Referente el tema que se trata, es suficiente saber que las características reológicas del asfalto influyen en su viscosidad, elasticidad, ductilidad y adherencia con el agregado pétreo.

### 1.5 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS N-CMT-4-05-001/06.

Contiene las características de calidad de los materiales asfálticos que se utilizan en la elaboración de carpetas y mezclas asfálticas.

La Normativa Mexicana N-CMT-4-05-001/06 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la Tabla 1.1 de este documento y se detalla a continuación.

Tabla 1. 1 Clasificación de los materiales asfálticos

Material asfálticos	Vehículo Para su Aplicación	Usos más comunes
Cemento Asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones Asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión Asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones.

Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.



Según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 1.2, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

Tabla 1. 2 Clasificación de los cementos asfáltico según su viscosidad dinámica a 60 °C

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (P <sub>[1]</sub> )	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10  (500 ± 100)	En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1.5. En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20  (1 000 ± 200)	En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1.5. En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1.5.
AC-20	200 ± 40  (2 000 ± 400)	En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 1.5. En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1.5.
AC-30	300 ± 60  (3 000 ± 600)	En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 1.5. En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 en la Figura 1.5 En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

Los cementos asfálticos deben de satisfacer los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.3



Tabla 1. 3 Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
<b>Del cemento asfáltico original:</b>				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s ( $P_{11}$ )	50 □ 10 (500 □ 100)	100 □ 20 (1 000 □ 200)	200 □ 40 (2 000 □ 400)	300 □ 60 (3 000 □ 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm <sup>2</sup> /s, mínimo (1 mm <sup>2</sup> /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s; 10 <sup>-1</sup> mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento;	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
<b>Del residuo de la prueba de la película delgada</b>				
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s ( $P_{11}$ ), Máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 °C; %, mínimo	46	50	54	58



Figura 1. 5 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica.



## **1.6 NORMATIVA PARA LA CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS N·CMT·4·05·002/06**

Esta Norma contiene las características de calidad de los materiales asfálticos modificados que se utilicen en la elaboración de carpetas y mezclas asfálticas.

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

### **- POLIMERO TIPO I**

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

### **- POLIMERO TIPO II**

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

### **- POLIMERO TIPO III**

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastomeros, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.



#### - HULE MOLIDO DE NEUMATICO

Es un modificador de asfaltos que mejoran la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

#### **1.6.1 Requisitos de calidad para cementos asfálticos modificados**

El empleo de los modificadores está condicionado al análisis de las ventajas que se obtengan de ellos para mejorar el comportamiento mecánico y la duración de los trabajos de pavimentación en cada caso específico y de acuerdo con las condiciones climáticas, de tránsito, la rigidez de la estructura del pavimento, la disponibilidad de los materiales, el periodo de vida útil considerado en el diseño, la estrategia de mantenimiento y el costo de operación de los vehículos, entre otros.

Su uso depende de la evaluación económica de su aplicación, en comparación con otras opciones. Corresponde al proyectista la selección del tipo de modificador a emplear y su dosificación, para cumplir con los parámetros de comportamiento deseado.

Los materiales asfálticos modificados, dependiendo del tipo de modificador empleado, deben cumplir con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.4



Tabla 1. 4 Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 y AC-20 modificados

Características	Tipo de cemento asfáltico (Tipo de modificador)				
	AC-5 (Tipo I ó II)	AC-20 (Tipo I)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Tipo III)	AC-20 (Hule molido)
<b>Del cemento asfáltico modificado:</b>					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, máximo	500	1000	1000	1000	--
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	--
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pa s, máximo	--	--	--	--	7
Penetración: • A 25°C, 100 g, 5 s; 10 <sub>-1</sub> mm, mínimo • A 4°C, 200 g, 60 s; 10 <sub>-1</sub> mm, mínimo	80 40	40 25	40 25	30 20	30 15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, mínimo	25	35	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30
<b>Del residuo de la prueba de la película delgada, (3,2 mm, 50 g):</b>					
Pérdida por calentamiento a 163°C; %, máximo	1	1	1	1	1
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s; 10 <sub>-1</sub> mm, mínimo	--	--	--	--	10
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s; %, mínimo	65	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C; %, mínimo	50	60	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máximo	--	--	--	--	10
Módulo reológico de corte dinámico a 76°C (G <sup>*</sup> /sen □); kPa, mínimo	--	2,2	2,2	2,2	2,2
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C (G <sup>*</sup> /sen □); kPa, mínimo	2,2	--	--	--	--
Angulo fase (□) [visco-elasticidad], a 76°C; ° (grados), máximo	--	75	70	75	--
Angulo fase (□) [visco-elasticidad], a 64°C; ° (grados), máximo	75	--	--	--	--





## 1.7 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS GRADO PG N·CMT·4·05·004 VERSIÓN 2008

Algunos de las limitantes de los sistemas de clasificación que hasta la actualidad han sido puestos en práctica se mencionan a continuación.

- Toman a la penetración como una medida meramente empírica de los efectos de la viscosidad y la elasticidad.
- No contemplan los efectos del asfalto a bajas temperaturas.
- Problemas con la caracterización de asfaltos modificados.
- Proliferación de especificaciones.
- El envejecimiento del asfalto a largo plazo no estaba considerado.

Es por eso que, a partir del 2008, se introdujo en México la clasificación de asfaltos grado PG, los cuales son utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas, utilizadas en la construcción de carpetas estructurales o carpetas delgadas de rodadura, ya sea como cementos asfálticos convencionales o modificados.

### 1.7.1 Grado de desempeño PG

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.



Figura 1. 6 regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG.



Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64°C y tan bajas como -22°C.

Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de 6 grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de 64 a 88°C y las mínimas, de -40 a -22°C.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que correspondan a uno de los 3 grados PG que se indican en la Figura 1.6, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestran en la misma Figura, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años ( $\Sigma L_{10}$ ) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la Tabla 1.5

Es importante recalcar que las temperaturas para elegir un ligante asfáltico de acuerdo al Grado PG son temperaturas que experimentará el pavimento durante su vida útil, más no la temperatura ambiental de la región. La temperatura máxima del aire se refiere al promedio de temperatura de los 7 días consecutivos más calurosos del año, mientras que la temperatura mínima se refiere a la temperatura del aire más fría del año. Ambas temperaturas se deberán obtener de acuerdo a registros meteorológicos del lugar del proyecto. Las temperaturas de diseño del pavimento pueden ser obtenidas mediante un cálculo por medio de la temperatura del ambiente, de acuerdo a los modelos analizados.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius. Generalmente las temperaturas máximas se encuentran en un rango de cuarenta y seis (46) a ochenta y dos (82) grados Celsius y las mínimas de menos cuarenta y cuatro (-44) a menos diez (-10) grados Celsius.

Los asfaltos Grado PG están especificados en incrementos de 6 °C; esto con el objetivo de obtener un porcentaje de confiabilidad aproximado de 98. La confiabilidad, en este caso, se refiere a la probabilidad de que, en un año, la temperatura máxima o mínima de diseño, no exceda la temperatura de diseño real.

El objetivo de la especificación PG para ligantes asfálticos fue el uso de grados de desempeño específicos para un deterioro relacionado con el clima y las cargas de tráfico. Por lo tanto, las mediciones de las pruebas deben ser realizadas a temperaturas y velocidades de carga consistentes con las condiciones existentes del pavimento.



Tabla 1. 5 Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad de tránsito esperada y con la velocidad de operación

Intensidad del tránsito ( $\square L_{10}$ ) [1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceiros)
$\square L_{10} < 106$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
106 $\square$ $\square L_{10}$ $\square$ 107	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\square L_{10} > 107$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

### 1.7.2 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG

El tema central de la clasificación del cemento asfáltico por Grado PG es la confianza sobre las pruebas del mismo en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto.

Pruebas realizadas en el asfalto original representan la primera etapa transportación, almacenamiento y manejo.

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el horno rotatorio de película delgada.

Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que es colocado en la mezcla asfáltica, carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

Los cementos asfálticos Grado PG, antes y después de envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones del envejecimiento que se espera tengan durante su vida útil en la obra, deben cumplir con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.6



Se optó por poner la tabla original (ASTM D6373) ya que esta contempla más temperaturas en la clasificación.

Tabla 1. 6 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG

Grado de Desempeño		58					64					70					76					82						
		-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento, °C		58					64					70					76					82						
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C		>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
Característica		Norma	Especificación																									
<b>Asfalto Original</b>																												
Punto de inflamación Cleveland, °C		ASTM D92	230 mínimo																									
Viscosidad rotacional @ 135 °C, Pa·s		ASTM D4402	3.0 máximo																									
Corte dinámico Geometría: 25 mm, Separación: 1 mm.	G*/sinδ, kPa	ASTM D7175	1.0 mínimo																									
	Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C		58	64	70	76	82																					
<b>Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) - (ASTM D 2872)</b>																												
Cambio de masa, %		ASTM D2872	1.0 máximo																									
Corte dinámico Geometría: 25 mm, Separación: 1 mm.	G*/sinδ, kPa	ASTM D7175	2.2 mínimo																									
	Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C		58	64	70	76	82																					
<b>Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV) - (ASTM D 6521)</b>																												
Temperatura de envejecimiento de PAV, °C	Climas normales	ASTM D6521	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	Climas desérticos		100	100	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
Corte dinámico Geometría: 8 mm, Separación: 2 mm.	G*(sinδ), kPa	ASTM D7175	5000 máximo																									
	Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C		25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31
Rigidez a flexión @ 60 s	Rigidez "S", Mpa	ASTM D6648	300 máximo																									
	Pendiente "m"		0.300 mínimo																									
	Temperatura de prueba, °C		-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18

- Las temperaturas del pavimento son estimadas de la temperatura del aire utilizando un algoritmo contenido en el programa LTPP también pudieran ser especificadas por el proyectista.
- El método de referencia debe ser el de la norma D 4402 utilizando una geometría del #21 a 20RPM, sin embargo, métodos alternativos pueden ser utilizados para pruebas rutinarias y de aseguramiento de calidad. Si el ligante es muy rígido para utilizar la geometría #21, la #27 puede ser utilizada. El tamaño de la geometría y la razón de corte deberán ser reportados. Este requisito no es obligatorio, será a discreción de la agencia de especificación si el proveedor garantiza que el ligante asfáltico puede ser bombeado y mezclado adecuadamente a temperaturas que cumplan todos los estándares de seguridad aplicables.
- Para el control de calidad de la producción de cementos asfálticos sin modificar, la medición de la viscosidad del cemento asfáltico original puede ser sustituida por las mediciones de corte dinámico G\*/sinδ a temperaturas donde el asfalto se comporte como un fluido Newtoniano. Cualquier normativa para medir la viscosidad puede ser utilizada, incluyendo el viscosímetro rotacional o capilar (Métodos de Prueba D 2170 o D 2171).
- La temperatura de envejecimiento del PAV está basada en condiciones climáticas simuladas y es una de las tres temperaturas 90°C, 100°C o 110°C. Generalmente, la temperatura de envejecimiento del PAV es 100°C para PG58xx y superiores. Sin embargo, para climas desérticos, se puede especificar una temperatura de 110°C para PG70xx y superiores.
- Si la rigidez se encuentra por debajo de 300 Mpa, la prueba de tensión directa no es requerida. Si la rigidez se encuentra entre 300 y 600 MPa, el requerimiento de deformación de falla de tensión directa puede ser utilizado en lugar del requerimiento de rigidez. El valor de la pendiente, m, requerido deberá ser satisfactorio en ambos casos



- Si los valores de la rigidez y la pendiente son imposibles de obtener debido a que el ligante es muy blando a la temperatura de prueba, se considerará que el ligante cumple con dicha temperatura de prueba si cumple con los requerimientos de dicha temperatura menos 6°C.

## 1.8 CALIDAD DE CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO DE DESEMPEÑO (PG) N·CMT·4·05·004 VERSIÓN 2018

Esta norma es similar a la versión de 2008, los cambios son los siguientes:

- No hay un mapa, ahora hay una ecuación para el cálculo,
- Se elimina el ajuste de tránsito
- Incluye el ensayo MSCR
- Propone una nueva tabla de clasificación.

La evaluación del ensayo MSCR se realiza de acuerdo a la norma N·CMT·4·05·004/18 En este ensayo se determina el porcentaje no recuperable del parámetro de conformidad, denominado  $J_{nr}$ . El porcentaje de recuperación tiene la intención de proporcionar un medio para determinar la respuesta elástica y la dependencia a dos niveles de esfuerzo diferentes, de ligantes modificados y no modificados, sujetos a diez ciclos de esfuerzo y recuperación.

La determinación de las temperaturas máxima y mínima del pavimento en la zona donde se construirá la obra se realizará como se indica a continuación:

Con el registro diario de las temperaturas ambientales máximas y mínimas de la zona donde se vaya a realizar la obra, se determinarán la temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) esperada en el pavimento, y la temperatura mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ) esperada en el pavimento, como sigue:

Empleando la siguiente fórmula se calculan las temperaturas máximas esperadas en la carpeta o la capa de rodadura del tramo por construir y se aproximará al valor superior más próximo de los considerados: cincuenta y ocho (58), sesenta y cuatro (64), setenta (70), setenta y seis (76) u ochenta y dos (82) grados Celsius.

$$T_{m\acute{a}x} = 54,32 + 0,78T_{airM} - 0,0025Lat^2 - 15,14 \log (H + 25) + (9 + 0,61\sigma_{TairM}^2)^{0,5} \text{ Ec.1}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$  = Temperatura máxima esperada del pavimento asfáltico debajo de la superficie (°C)

$T_{airM}$  = Temperatura máxima promedio del aire de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos de 20 años en la zona, (°C) Lat = Latitud del tramo de diseño, (°, con aproximación de 5 decimales)

H = Profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm)

Z = Valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2,055 para una confiabilidad de 98%)



$\sigma_{T_{airM}}$  = Desviación estándar de la temperatura de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos 20 años en la zona, (°C).

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72T_{airm} - 0,004Lat^2 + 6,26 \log (H + 25) - (4,4 + 0,52\sigma_{T_{airm}}^2)^{0,5} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$T_{\min}$  = Temperatura mínima esperada del pavimento asfáltico debajo de la superficie, (°C)

$T_{airm}$  = Promedio de las temperaturas mínimas anuales del aire registradas en al menos los últimos 20 años en la zona, (°C)

Lat = Latitud del tramo de diseño, (°, con aproximación de 5 decimales)

H = Profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm)

Z = Valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2,055 para una confiabilidad de 98 %)

$\sigma_{T_{airm}}$  = Desviación estándar de las temperaturas mínimas anuales del aire registradas en al menos en los últimos 20 años en la zona, (°C).

### 1.8.1 Requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) seleccionado

Después de seleccionar el grado de desempeño (PG) del cemento asfáltico según el clima del sitio, como se indica en la Fracción anterior, se ajustarán sus requisitos de calidad eligiendo el nivel de ajuste que le corresponda de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1.7 considerando la intensidad del tránsito esperada y la velocidad de operación de la carretera, el cual se representará con una letra que indicará cuando el ajuste sea Normal (S), Alto (H), Muy Alto (V) o Extremadamente Alto (E) y que se agregará al grado de desempeño (PG).

Por ejemplo, si el grado de desempeño (PG) seleccionado de acuerdo con las temperaturas máxima y mínima es PG 76-16, la intensidad del tránsito es de veinte millones ( $20 \times 10^6$ ) de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas (L) y la velocidad de operación es mayor de setenta (70) kilómetros por hora, entonces el nivel de ajuste será Alto (H) por lo que se requerirá un cemento asfáltico PG 76H-16.

Tabla 1. 7 Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación.

Velocidad de operación km/h	Nivel de ajuste		
	v > 70	20 v 70	v < 20
Intensidad del tránsito (L) [1]			
L < 10 <sup>6</sup>	Normal (S)	Alto (H)	Muy alto (V)
10 <sup>6</sup> L 30×10 <sup>6</sup>	Alto (H)	Alto (H)	Muy alto(V)
L > 30×10 <sup>6</sup>	Muy alto (V)	Muy alto(V)	Extremadamente alto (E)

L es el número de ejes equivalentes de 8,2 t acumulados durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño que en ningún caso será menor de diez (10) años.



### 1.8.2 Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG)

Los cementos asfálticos con los grados de desempeño (PG) después de envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones del envejecimiento que se espera tengan durante su vida útil en la obra, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.8

Tabla 1. 8 Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste.

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	PG 64		PG 70		PG 76		PG 82	
	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
Temperatura máxima del pavimento [1], °C	64		70		76		82	
Temperatura mínima del pavimento [1], °C	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
<b>Cemento asfáltico original</b>								
Punto de inflamación Cleveland [2], °C, mín.	230							
Viscosidad rotacional 135°C [2], Pa·s, máx.	3							
Punto de reblandecimiento [2], °C, mín.	48		55					
Separación, diferencia anillo y esfera [2], °C, máx.	-		2					
Recuperación elástica por torsión 25°C [2], %, mín.	-		35					
Módulo reológico de corte dinámico [2] (G*/sen δ) [2], kPa, mín.	1,0							
Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
<b>Después de envejecimiento en horno RTFO [2]</b>								
Pérdida por calentamiento [2], %, máx.	1,0							
Recuperación elástica en ductilómetro [5], 25°C, %, mín.	-		75					
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) [2], kPa, mín.	2,2							
Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
Trafico Normal "S", Nivel de Ajuste (MSCR) [3]	4,0							
Jnr a 3,2 kPa en MSCR [2] [4]; kPa-1, máx.	4,0							
Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR [2][6]; %, mín.	-		25					
Tráfico Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) [3]	2,0							
Jnr a 3,2 kPa en MSCR [2] [4]; kPa-1, máx.	2,0							
Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR [2][6]; %, mín.	-		25					
Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR) [3]	1,0							
Jnr a 3,2 kPa en MSCR [2] [4]; kPa-1, máx.	1,0							
Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR [2][6]; %, mín.	-		30					
Tráfico Extremadamente Alto "E", Nivel de Ajuste (MSCR) [3]	0,5							



Jnr a 3,2 kPa en MSCR [2] [4] kPa-1, máx.				
Temperatura de prueba, °C	64	70	76	82
Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR [2][6]; %, mín.	-	40		

## CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Se describen los ensayos especificados en cada una de las normas de la SCT utilizadas.

### 2.1 NORMA N·CMT·4·05·001/06 CALIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS.

Esta norma contempla diferentes ensayos, los cuales son:

- Penetración M·MMP·4·05·006.
- Punto de reblandecimiento M·MMP·4·05·009.
- Ductilidad a 25°C M·MMP·4·05·011.

#### 2.1.1 Penetración en cementos y residuos asfálticos (M·MMP·4·05·006/00)

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro y con aproximación a la unidad, valor conocido también como grado de penetración. Las penetraciones utilizadas para el cálculo del promedio, deben estar dentro de las diferencias permisibles mostradas en la Tabla 2.1 de lo contrario la prueba se repetirá. En el reporte quedarán asentados la temperatura, la masa y el tiempo de penetración con los que se realice la prueba.

Tabla 2. 1 Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados

Valor de la penetración	Diferencias permisibles
0 – 49	2
50 – 149	4
150 – 249	6
250 ó más	8





Figura 2. 1 Penetrometro para la prueba de penetración

### 2.1.2 Punto de reblandecimiento (M·MMP·4·05·009/00)

Consiste en determinar el punto de reblandecimiento del asfalto en el rango de 30 a 157°C, usando el aparato de anillo y esfera, permitiendo estimar la consistencia de los cementos asfálticos, basándose en la temperatura, en la cual una esfera produce una deformación de 25 mm.

Los asfaltos son materiales viscoelásticos sin puntos de fusión bien definidos; que gradualmente se vuelven más suaves y menos viscosos cuando la temperatura se eleva. Por esta razón, los puntos de reblandecimiento deben ser determinados por un método arbitrario y estrechamente definido si los resultados han de ser reproducibles.

El punto de reblandecimiento es útil en la clasificación de los asfaltos, como un elemento en el establecimiento de la uniformidad de los envíos o fuentes de suministro, y es indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas encontradas en servicio, así mismo estima la consistencia de los cementos asfálticos, la cual una esfera produce una deformación de 25 mm.



Figura 2. 2 Equipo de ensayo para punto de reblandecimiento

Se reporta como punto de reblandecimiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas, con aproximación de  $0.5^{\circ}\text{C}$  indicando el líquido utilizado para la prueba.

### 2.1.3 Ductilidad de cementos (M·MMP·4·05·011/07)

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos, del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas, puede ser estirada sin romperse.

Se reporta como resultado de la prueba a una velocidad de  $5\text{cm}/\text{min}$ , con una variación de  $0.5\%$  hasta producir la ruptura de la briqueta, en este momento se lee el desplazamiento de la mordaza y se registra en centímetros.



Figura 2. 3 Moldes para elaborar la briqueta

## 2.2 NORMA N·CMT·4·05·002/06 CALIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.

Todos los anteriores más:

- Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·024)
- Recuperación elástica en ductilómetro (M·MMP·4·05·026)

### 2.2.1 Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·024)

La norma M-MMP-4-05-024 consiste en inducir una deformación angular mediante un cilindro de acero de dimensiones específicas, embebido en una muestra de cemento asfáltico modificado, con el objeto de observar su capacidad de recuperación; eso con el fin de determinar la capacidad de recuperación elástica de los ligantes asfálticos y ligantes modificados.

Se reporta el porcentaje (%) de recuperación con respecto al ángulo inicial del 80% utilizado la ecuación 4.

$$Re = \frac{L}{180} * 100 \quad EC.4$$

DONDE:

Re= Recuperación elástica (%)

L= Ángulo de recuperación (%)

En la Figura 2.4 se muestra el equipo para la ejecución de la prueba la cual está en condiciones de realizar la prueba.



Figura 2. 4 Aparato de torsión

### 2.2.2 Recuperación elástica en ductilómetro M·MMP·4·05·026

Esta prueba permite determinar la recuperación elástica del residuo de la prueba de película delgada. La prueba consiste en mantener una muestra de prueba estirada en un ductilómetro durante un tiempo determinado, después del cual se corta por la mitad, se deja reposar y finalmente se observa cuánto se recupera la deformación.

Como es mostrado en la Figura 2.5 constituido fundamentalmente por un dispositivo para estirar la briqueta de material asfáltico a una velocidad uniforme y sin velocidades perjudiciales, de tal manera que durante la prueba la muestra permanezca sumergida.



Figura 2. 5 Ductilidad y moldes

Se reporta como recuperación elástica el porcentaje de deformación recuperada respecto a la deformación total, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{20 - x}{20} \times 100 \quad \text{EC. 5}$$

Donde:

R= Recuperación elástica en ductilómetro, (%)



X= lectura del desplazamiento de la mordaza al unir los extremos cortados del espécimen, (cm)

### **2.1.3 Separación de polímero M-MMP-4-05-022**

La prueba consiste en comparar el punto de reblandeciendo (anillo y esfera) en las partes superiores e inferiores en las muestras tomadas de un tubo con asfalto modificado con polímero y sellado.

Se reporta como la separación (diferencia en la temperatura anillo y esfera) con aproximación de 0.5°C el resultado obtenido mediante la siguiente expresión indicando el líquido utilizado para la prueba.

$$D= (Ts-Ti) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

D= Separación (diferencia en la temperatura anillo y esfera)

Ts=promedio de las dos temperaturas correspondientes al punto de reblandecimiento de la parte superior de los tubos (°C)

Ti= promedio de las dos temperaturas correspondientes al punto de reblandecimiento de la parte inferior de los tubos (°C)

Para que el resultado se considere satisfactorio la diferencia entre las mediciones de ambas pruebas, es decir, entre los dos valores de Ts o de Ti no será mayor de 2°C



## 2.3 CALIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS GRADO PG N·CMT·4·05·004/08

- Viscosidad Rotacional (ASTM D4402-12)
- Propiedades Reológicas en reómetro de corte dinámico (DSR) RTFO Y PAV( ASTM D7175-08)
- Horno rotatorio de película delgada (RTFO) ASTM D2872 -04 RTFO
- Vasija de envejecimiento a presión (PAV) ASTM D6521-08
- Rigidez en reómetro de viga a flexión (BBR) ASTM D6648-08
- Adicionalmente se realizó el ensayo de densidad ASTM D70-09

### 2.3.1 Método estándar para determinar la viscosidad del asfalto a temperaturas elevadas utilizando un viscosímetro rotacional ASTM D4402-15

La viscosidad rotacional se utiliza para evaluar la manejabilidad del asfalto a altas temperaturas. Se usa un viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional.

Proporciona un método para medir la viscosidad de los ligantes asfálticos en el intervalo de temperatura de 135°C.

El viscosímetro consiste en un motor, el vástago, teclas de control y un indicador digital, el motor mueve al bastago a través de un soporte de torsión. El resorte es enrollado a medida que el torque aumenta.

Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas con el objetivo de asegurar que el asfalto es suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezclado. Por lo tanto, la viscosidad se mide sobre el asfalto sin envejecer y de acuerdo a la norma no debe de superar los 3Pa.s para la temperatura de 135°C.

En la Figura 2.6 se muestra el equipo de medición de viscosidad rotacional.



Figura 2. 6 Viscosímetro rotacional



Se calcula el resultado como el promedio aritmético de las 3 lecturas a cada 60 seg; así mismo se reporta el resultado de la viscosidad en Pa\*s, la temperatura de prueba, el tipo y tamaño de la geometría utilizada, el % en torque obteniendo en la medición, y la velocidad en rpm.

- Promedio de la viscosidad.
- Torque (%).

### 2.3.2 Método estándar para determinar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR) Condición original, RTFO, PAV ASTM D7175-15

En la metodología del Grado PG, el principal equipo es el DSR, el cual permite caracterizar las propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico: módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ), a distintas temperaturas. La evaluación, como ya se detalló previamente, se realiza en tres diferentes condiciones del asfalto: "original" o "no envejecido", envejecido en RTFO, y envejecido en PAV. Las características de los ensayos se resumen en la tabla 2.2

Tabla 2. 2 Ensayos en el DSR ASTM D7175-15.

	Original	RTFO	PAV
Temperatura	Alta	Alta	Intermedia
Rango de T (°C)	48 – 88	48 – 88	4 – 40
Geometría (mm)	25	25	8
Espesor (mm)	1	1	2
f (rad/s)	10		
$\gamma$ (%)	12	10	1
Parámetro	Deformación		Fatiga
	$G^*/\sin\delta$	$G^*/\sin\delta$	$G^*\sin\delta$
Referencia (kPa)	1	2	5000

Los valores de ( $G^*$ ) G estrella y ( $\delta$ ) delta en los asfaltos dependen en gran medida de la temperatura y frecuencia de carga. A altas temperaturas (superiores a las de los pavimentos en servicio) los asfaltos se comportan como fluidos viscosos, como indica el eje vertical en la figura... Por otro lado, a temperaturas muy bajas (inferiores a la de los pavimentos) los asfaltos se comportan como solidos elásticos, como muestra el eje horizontal en la figura



2.7

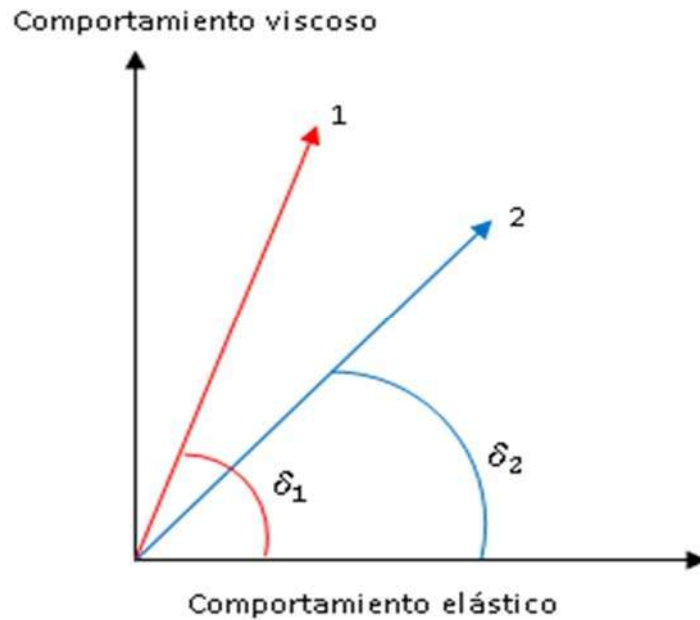


Figura 2. 7 Comportamiento elástico y viscoso

A las temperaturas en que la mayoría de los pavimentos soportan el tráfico, los asfaltos (como los representados por los vectores 1 y 2) se comportan simultáneamente como líquidos viscosos y sólidos. Bajo carga, parte de la deformación es elástica (recuperable) y parte es viscosa (no recuperable). Por ello el asfalto es definido como un material viscoelástico. Por ejemplo, en la figura 2.8 aun cuando ambos asfaltos son viscoelásticos, el asfalto 2 es más elástico que el asfalto 1 por su menor ángulo de fase ( $\delta$ )

La importancia de evaluar el ángulo de fase y no sólo el módulo de corte para determinar la resistencia de los asfaltos, reside en que dos ligantes asfálticos (A y B) pueden tener el mismo  $G^*$ , pero distinta proporción viscosa y elástica ( $\delta$ ), como se observa en la Figura 2.8.

En dicho caso, el asfalto B tiene un mejor comportamiento, ya que su parte elástica es mayor que la del asfalto A. Esto quiere decir, que, si una misma carga es aplicada a ambos asfaltos, el asfalto A tendrá más deformación no recuperable (permanente) que el asfalto B



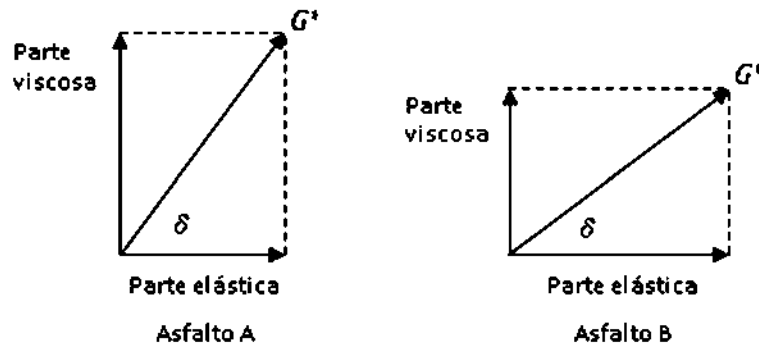


Figura 2. 8 Importancia de  $\delta$  en la reología.

Midiendo  $G^*$  y  $\delta$ , el DSR ofrece una deformación más completa del comportamiento del asfalto a las temperaturas de servicio del pavimento.

El ensayo consiste en aplicar, mediante el software del reómetro, un esfuerzo oscilatorio constante y la medición del esfuerzo y del desfase de tiempo resultantes. Las especificaciones requieren de una velocidad de oscilación de 10 radianes/seg, Aproximadamente 1...59 Hz. EL DSR emplea una computadora para controlar los parámetros del ensayo y registrar los resultados. Materiales relativamente blandos ensayados a altas temperaturas (ej. ligantes sin envejecer y ligantes envejecidos en el RTFO) son ensayados a deformaciones aproximadas de 10 a 12%. Materiales duros (por ejemplo, residuos de PAV ensayados a temperaturas moderadas) son sometidos a deformaciones cercanas al uno por ciento.

Al inicio del ensayo el reómetro mide el esfuerzo requerido para lograr el valor de deformación fijado, y luego mantiene este esfuerzo en forma muy precisa durante el ensayo. La deformación por corte puede variar ligeramente con respecto al valor establecido para lograr este esfuerzo constante. Esta variación es controlada por el software del reómetro y no por el operador.

Al iniciar el ensayo el software automáticamente calcula y reporta los valores de  $G^*$   $\delta$ , los cuales pueden ser comparados con los requisitos de las especificaciones.

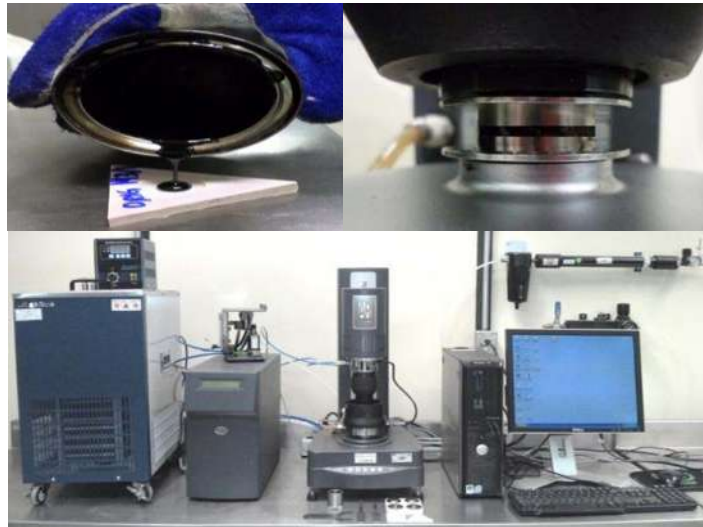


Figura 2. 9 Reómetro de Corte Dinámico.

El DSR puede medir muchas variables, sin embargo solo  $G^*$  y  $\delta$  son requeridas por las especificaciones en la mayoría de los casos, el software usado por el DSR hace todos los cálculos necesarios para determinar  $G^*$  y  $\delta$ . Así al obtener estos resultados la computadora, solo se requiere comparar los resultados con los requerimientos de las especificaciones para determinar su cumplimiento.

Un informe completo incluye:

- $G^*$  con tres cifras significativas □  $\delta$  con precisión de 0.1 grados.
- Tamaño del plato de ensayo con precisión de 0.1mm y separación con precisión de 1micron.
- Temperatura de ensayo con precisión a 0.1°C.
- Frecuencia de ensayo con precisión de 0.1 rad/seg
- Amplitud de deformación con precisión de 0.01 por ciento.

Dos valores de se usan en las especificaciones. La deformación permanente se controla limitando el valor mínimo de antes del envejecimiento y a 2.2kPa luego del envejecimiento del RTFO, a la temperatura de ensayo.

El operador no necesita preocuparse en ajustar el esfuerzo a aplicar.

### 2.3.3 Método estándar para determinar el efecto del aire y calor en una película de asfalto en movimiento (ensayo en horno rotatorio de película delgada. (RTFO) ASTM D2872-12

Según ASTM D2872-12 el procedimiento del RTFO se utiliza para dos propósitos. Uno es proveer un envejecimiento al cemento asfáltico que puede usarse en pruebas posteriores de propiedades físicas. La segunda es determinar la cantidad de masa de aceites volátiles



perdida del asfalto durante el mezclado. La masa de aceites volátiles perdida, es una indicación de que el envejecimiento pudiera ocurrir en el asfalto durante las operaciones de mezclado y construcción.

El ensayo de RTFO requiere un horno de convención calentado eléctricamente. Los requisitos se detallan en las especificaciones ASTM D2872-12 el horno contiene un disco giratorio, en cuyos orificios se ubican las botellas con las muestras. Un motor hace girar el disco alrededor de su centro. Hay también una boquilla que sopla aire en cada botella, en la posición inferior de la trayectoria circular.

Este método de ensayo indica el cambio aproximado de las propiedades del asfalto durante el calentamiento convencional a 150°C. Se obtiene un residuo que se aproxima a la condición de asfalto tal como se incorpora en el pavimento. Este método de ensayo también se puede utilizar para determinar el cambio de masa, que es una medida de la volatilidad del asfalto.



Figura 2. 10 Horno rotatorio de película delgada (RTFO)

Debido a que los ensayos RTFO y PAV son considerados técnicas de envejecimiento, no se informan los resultados con excepción de la pérdida de masa luego del envejecimiento en el RTFO y para calcular el cambio de masa de cada frasco en porcentaje con una precisión de 0.001 g, utilizando la ecuación 5:

$$CM(\%) = \frac{(C - A) - (B - A)}{(B - A)} * 100 \quad EC.5$$

DONDE:

CM: Cambio de masa

A, B, C, D: Nombre de los vasos.



Figura 2. 11 Componente del (RTFO)

### 2.3.4 Practica estándar para el envejecimiento acelerado de un ligante asfáltico utilizando una vasija de envejecimiento a presión (PAV) ASTM D2872-12

La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original; representa la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga, esta deformación es irrecuperable. Si bien las roderas pueden tener varias causas (debilidad de la HMA por cambios de humedad, abrasión, densificación del tránsito).

Según el ASTM D2872-12, el PAV expone al asfalto a presiones y altas temperaturas durante 20 horas para reproducir el efecto del envejecimiento a largo plazo. El asfalto que se expone al envejecimiento a largo plazo tiene que haber pasado por el proceso de mezclado y construcción; el procedimiento PAV utiliza el asfalto envejecido en el RTFO.

El ensayo se efectuó utilizando una Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV), dentro de la cual se coloca el estante con las charolas para PAV con  $50 \pm 0.5$  g de residuo de RTFO en cada una. La prueba se lleva a cabo a una temperatura de  $100$  °C con una presión constante de  $2.1 \pm 0.1$  MPa durante  $20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$ . Una vez finalizadas las 20 h del envejecimiento, se comienza la reducción de la presión durante 15 minutos para posteriormente retirar el estante con las charolas del PAV.

Las charolas se colocan en un horno a  $168 \pm 5$  °C por un periodo de  $15 \pm 1$  min para que las muestras de asfalto adquirieran fluidez y se puedan verter en un recipiente. Finalmente, se coloca el recipiente con el asfalto recuperado en un horno de vacío a  $170$  °C  $\pm 5$  °C por un periodo de  $15 \pm 1$  min, esto para eliminar las burbujas de aire que se encuentran dentro del asfalto debido a la presión inducida durante el ensayo. Al asfalto recuperado de las se le llama: residuo de PAV



Figura 2. 12 Vasija de envejecimiento a presión (PAV) y sus componentes

Debido a que los ensayos RTFO y PAV son considerados técnicas de envejecimiento no se informan los resultados.

El informe del ensayo PAV contiene:

- Identificación de la muestra
- Temperatura del ensayo
- Presión máxima registrada durante el envejecimiento (MPa)
- Tiempo total durante el envejecimiento en el que la temperatura no cumplió el rango especificado, con una presión de 0.1 minuto.
- Tiempo total de envejecimiento, en horas y minutos.

### **2.3.5 Método estándar para determinar la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el réómetro de viga a flexión (BBR) ASTM D6648-08.**

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D6648-08, el BBR se utiliza para medir qué tanto se flexiona o fluye el asfalto bajo una carga con temperatura constante y temperaturas que corresponden a las más bajas de servicio en el pavimento, para las que el asfalto actúa más bien como un sólido elástico.

El ensayo se vale de la teoría de vigas para medir la rigidez de una pequeña viga de asfalto simplemente apoyada, bajo carga de creep para simular los esfuerzos que gradualmente se producen en un pavimento al bajar la temperatura.



Dos parámetros se evalúan con el BBR: la rigidez a la fluencia, que es un indicador de como el asfalto resiste una carga constante, y el valor-m, que mide la variación de la rigidez del asfalto al aplicar la cargas.

Se evalúa el agrietamiento que sufre un pavimento debido a las bajas temperaturas experimentadas durante su vida útil, se utiliza residuo de PAV debido a que es el asfalto en su condición más rígida, cuando es más propenso a presentar este modo de falla. Las temperaturas de prueba para este ensayo se basan en la mínima que el asfalto experimentará en el área geográfica donde será utilizado.



Figura 2. 13 Equipo BBR

Para obtener la rigidez a la fluencia del asfalto en este ensayo se emplea la teoría clásica de la resistencia de materiales. La fórmula para calcular la rigidez,  $S(t)$ , es la siguiente.

$$S(t) = PL^3 / 4bh^3 \delta(t) \quad \text{EC. 7}$$

Donde:

- S (t)= rigidez a la fluencia para t=60
- P= carga constante aplicada, 100g. (980mN)
- L= distancia entre los apoyos de la viga, 102mm
- b= ancho de la viga, 12.5mm, h=altura de la viga, 6.5mm
- (t)= deflexión para t=60 segundos



El valor-m es la pendiente de la curva del logaritmo de la rigidez en función del logaritmo del tiempo, en cualquier momento t. las especificaciones requieren que el valor-m medido a 60 segundos sea mayor o igual a 0.300.

La computadora automáticamente informa todos los valores requeridos. Incluyendo un gráfico de la deflexión y de la carga en función del tiempo, carga real y valores de deflexión en distintos tiempos, parámetros de ensayo e información del operador.

### 2.3.6 Densidad de materiales bituminosos semi-sólidos (método del picnómetro) ASTM D70-09.

Para determinar la densidad del asfalto se utilizó la norma ASTM D70-09. La gravedad específica de los aglutinantes de asfalto varía con la temperatura y la fuente del ligante. Si se necesita un valor exacto que se debe medir.

En este método de ensayo, la gravedad específica se determina por medio de un vaso picnómetro y debe cumplir con el requisito de AASHTO T228. La gravedad específica se utiliza para convertir el peso entre el volumen. Al igual que con otros materiales orgánicos, la gravedad específica de ligantes asfálticos cambia dramáticamente con la temperatura.



Figura 2. 14 Cambio de masa

Se calcula la densidad relativa con una precisión de 0.001 g, con la ecuación 8.

$$\text{densidad relativa} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad \text{EC. 8}$$

DONDE:



A=Masa del picnómetro (con tapón)  
B=Masa del picnómetro + agua  
C=Masa del picnómetro + asfalto  
D=Masa del picnómetro + asfalto + agua

Posteriormente se calcula la densidad con una precisión de 0.001g, como sigue:

$$\text{Densidad} = \text{densidad relativa} * W_T \quad \text{EC. 9}$$

Tabla 2. 3 Temperatura de densidad

Temperatura (°C)	$W_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$W_T$ (Kg/L)
15.6	999	0.999
25	997	0.997

#### 2.4 GRADO PG N·CMT·4·05·004/08 CREPP + N·CMT·4·05·004/18

- Todas las de la norma N·CMT·4·05·004/08
- Recuperación Elástica por Esfuerzo Múltiple (MSCR) N·CMT·4·05·004/18





### 2.4.1. Recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR)

La deformación permanente, se refiere a la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables, lo cual se traduce en una modificación a la sección transversal del pavimento, generando lo que se conoce como roderas o ahuellamiento.

En este método se determina el porcentaje no recuperable del parámetro de conformidad, denominado  $J_{nr}$ . El porcentaje de recuperación tiene la intención de proporcionar un medio para determinar la respuesta elástica y la dependencia a dos niveles de esfuerzo diferentes, de ligantes modificados y no modificados, sujetos a diez ciclos de esfuerzo y recuperación. El ensayo se ejecuta en el DSR con una muestra —residuo de RTFO— de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor y consiste en aplicar un esfuerzo controlado de 0.1 kPa durante 10 ciclos y posteriormente aplicar un esfuerzo de 3.2 kPa durante otros 10 ciclos. Cada ciclo consiste en la aplicación del esfuerzo durante 1 s y posteriormente 9 s de recuperación, resultando una duración total de 10 s por ciclo.

Un ciclo de prueba se observa como en la Figura 2.15, donde se genera una deformación total durante el primer segundo y una deformación recuperada durante los nueve segundos siguientes. De los valores anteriores se obtiene la deformación no recuperable (permanente) por ciclo. La temperatura del ensayo es la obtenida como temperatura alta determinada con los ensayos de rigidez del Grado PG.

Una vez concluido el ensayo se registraron los siguientes datos para cada uno de los 10 ciclos (N) de cada nivel de esfuerzo, esto para obtener los parámetros mencionados previamente:

1. Deformación inicial de cada aplicación de esfuerzo  $\epsilon_0$ .
2. Deformación final de cada aplicación de esfuerzo  $\epsilon_c$ .
3. Deformación ajustada al final de cada aplicación de esfuerzo (seg 1)  $\epsilon_1$ .
4. Deformación final de cada recuperación,  $\epsilon_r$
5. Deformación ajustada al final de cada recuperación (segundo 10)  $\epsilon_{10}$ .

Ciclo (N)

0

1

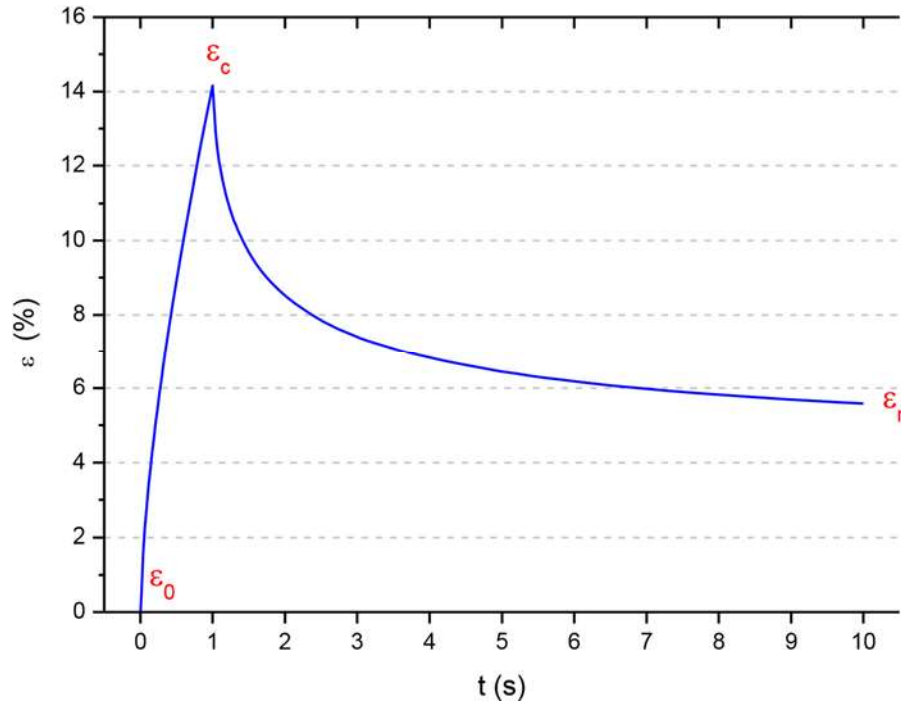


Figura 2. 15 Ciclo 1, ensayo MSCR

Posteriormente, con los datos obtenidos anteriores, se realizaron los siguientes cálculos para obtener los porcentajes de recuperación de los ligantes, así como el parámetro de conformidad de los mismos.

1. Porcentaje de recuperación a 0.1 kPa,  $(0.1, N)$  y 3.2 kPa  $(3.2, N)$ , de cada ciclo  $N$ .
2. Porcentaje de recuperación promedio a 0.1 kPa y 3.2 kPa.
3. Porcentaje de diferencia de recuperación entre 0.1 kPa y 3.2 kPa.
4. Parámetro de conformidad  $J(0.1, N)$ ,  $\text{kPa}^{-1}$  y  $J_{nr}(3.2, N)$ ,  $\text{kPa}^{-1}$ , se calcula como deformación/esfuerzo, para cada ciclo  $N$ .
5. Porcentaje de diferencia del parámetro de conformidad entre 0.1 kPa y 3.2 kPa.

Una vez realizados los cálculos anteriores, se grafica el porcentaje de recuperación  $R_{3.2}$ , contra el parámetro de conformidad  $J_{nr3.2}$ , de cada ligante asfáltico como se indica en el método de ensayo. El porcentaje de recuperación  $R$ , tiene como objetivo determinar la respuesta elástica del ligante y su dependencia al esfuerzo aplicado. La curva en la Figura 2.16 se utiliza como indicador de la presencia de un polímero elastoméricos.

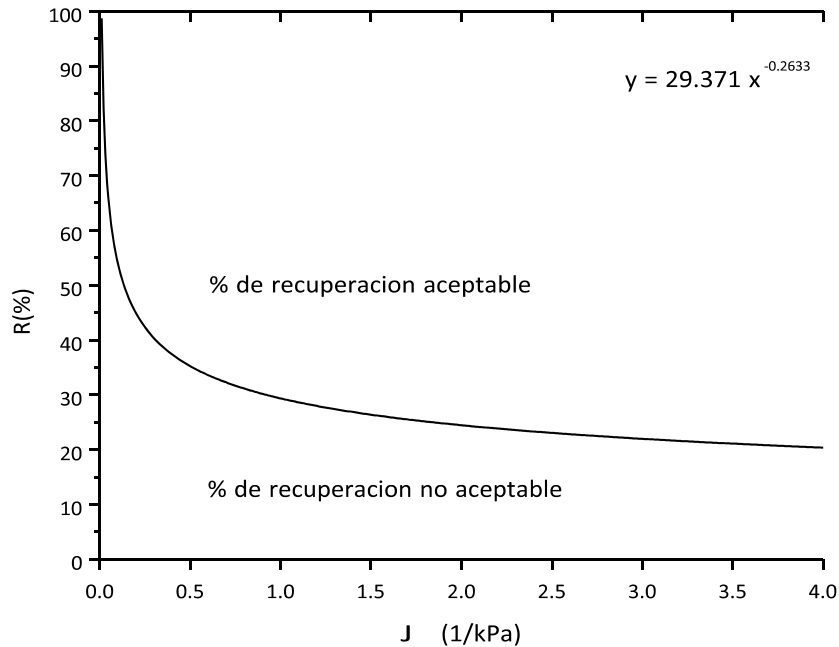


Figura 2. 16 Parámetro de conformidad vs. Porcentaje de recuperación

Finalmente, se realiza una clasificación por medio de la norma, la cual indica que el ligante se puede clasificar de acuerdo a su  $J_{nr}$  en cuatro distintos grados de desempeño, indicados en la Tabla 2.4 Estos grados se definen mediante una nueva clasificación PG, donde se sustituye el ensayo de rigidez después de RTFO en el DSR — por el ensayo MSCR, para determinar la resistencia a la deformación permanente de los ligantes asfálticos.

Tabla 2. 4 Grado de desempeño, MSCR

Grado	ESALs (millones)	Velocidad de tránsito (km/h)
Estándar "S"	< 10	y > 70
Alto "H"	10 – 30	ó 20 - 70
Muy Alto "V"	> 30	ó < 20
Extremadamente Alto "E"	> 30	y < 20



Tabla 2. 5 requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	PG 64		PG 70		PG 76		PG 82	
	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
Temperatura máxima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≤ 64		≤ 70		≤ 76		≤ 82	
Temperatura mínima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22
<b>Cemento asfáltico original</b>								
Punto de inflamación Cleveland <sup>[2]</sup> , °C, mín.	230							
Viscosidad rotacional 135°C <sup>[2]</sup> , Pa·s, máx.	3							
Punto de reblandecimiento <sup>[2]</sup> , °C, mín.	48				55			
Separación, diferencia anillo y esfera <sup>[2]</sup> , °C, máx.	-				2			
Recuperación elástica por torsión 25°C <sup>[2]</sup> , %, mín.	-				35			
Módulo reológico de corte dinámico <sup>[2]</sup> (G*/sen δ) <sup>[2]</sup> , kPa, mín.	1,0							
· Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
<b>Después de envejecimiento en horno RTFO <sup>[2]</sup></b>								
Pérdida por calentamiento <sup>[2]</sup> , %, máx.	1,0							
Recuperación elástica en ductilómetro <sup>[5]</sup> , 25°C, %, mín.					75			
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) <sup>[2]</sup> , kPa, mín.	2,2							
· Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		70		76		82	
Trafico Normal "S", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	4,0							
· Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][4]</sup> ; kPa-1, máx.								
· Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
· Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> ; %, mín.	-				25			
Tráfico Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	2,0							
· Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][4]</sup> ; kPa-1, máx.								
· Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
· Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> ; %, mín.	-				25			
Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	1,0							
· Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][4]</sup> ; kPa-1, máx.								
· Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
· Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> ; %, mín.	-				30			
Tráfico Extremadamente Alto "E", Nivel de Ajuste (MSCR) <sup>[3]</sup>	0,5							
· Jnr a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][4]</sup> ; kPa-1, máx.								
· Temperatura de prueba, °C	64		70		76		82	
· Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR <sup>[2][6]</sup> ; %, mín.	-				40			

[1] Determinada como se indica en el inciso D.1.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda.

[3] Los niveles de ajuste.

[4] Jnr representa la fluencia relativa del cemento asfáltico y la prueba con que se determina simula las condiciones de trabajo del cemento asfáltico durante la vida útil del pavimento.

[5] Determinado mediante el procedimiento de prueba correspondiente al método de ensayo.

[6] La respuesta elástica es el porcentaje de deformación recuperada en cada ciclo de esfuerzo-deformación-recuperación y permite determinar el comportamiento elástico y la susceptibilidad a la deformación del cemento asfáltico.



Continuación de la Tabla 2.5

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	PG 64		PG 70		PG 76		PG 82	
	-16	-22	-16	-22	-16	-22	-16	-22
Temperatura máxima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≤ 64		≤ 70		≤ 76		≤ 82	
Temperatura mínima del pavimento <sup>[1]</sup> , °C	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22	≥ -16	≥ -22
<b>Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)</b>								
Temperatura de envejecimiento PAV <sup>[2]</sup> , °C	100							
· En climas normales	100		110					
· En climas desérticos								
Rigidización (G*sen δ) <sup>[2]</sup> , kPa, máxima	5 000							
· Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	28	25	31	28	34	31	37	34
Rigidez de Flexión <sup>[2]</sup>								
S(t) <sup>[1]</sup> , máximo 300 Mpa	-6	-12	-6	-12	-6	-12	-6	-12
Valor m, mínimo 0,300								
· Temperatura de prueba, @ 60 s, °C								

[1] Determinada como se indica en el inciso D.1.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de las Normas y Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.



## CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se evaluó el asfalto EKBE de la refinería Salamanca de grado PG 64-16, con diferentes polímeros y porcentajes, como se muestra en la tabla 3.1

Tabla 3. 1 Polímero y porcentaje

Polímero	Porcentaje
Elvaloy 4170 / PPA	1.1 / 0.15%
Elvaloy 4170 / PPA	1.2 / 0.1%
Hule molido de llanta	4%
SBS	

Para esto se realizarán ensayos al asfalto con los diferentes porcentajes de Elvaloy, en las propiedades físicas se evaluó; Recuperación elástica por torsión, Punto de reblandecimiento, Penetración, Ductilidad, Recuperación elástica por ductilómetro, Densidad específica del asfalto. En cuanto a evaluación de grado PG; Viscosidad rotacional, Ensayo reológico de corte dinámico en condición original, Ensayo reológico de corte dinámico en condición RTFO, Ensayo reológico de corte dinámico en condición PAV, Ensayo de la película delgada en horno rotatorio RTFO, Ensayo de envejecimiento con olla de presión PAV, y Ensayo con el reómetro de viga a flexión BBR y Evaluación a deformación permanente; Creep.

Con los resultados obtenidos en los diferentes ensayos se revisará la influencia del Elvaloy en el comportamiento del cemento asfáltico, así como en su clasificación por Grado PG.

Se utilizó el asfalto modificado (SBS), pero es comercial por lo que ya venía mezclado.

### 3.1. PROCESO DE INCORPORACION

#### 3.1.1 Proceso de mezclado del ELVALOY-PPA

Se realizó el procedimiento de incorporación de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, donde inicialmente se precalienta el asfalto a una temperatura de 180 °C de tal manera que se encuentre fluido, posteriormente se vierte y pesa una cantidad apropiada del cemento asfáltico en una lata, la cual se coloca sobre una parrilla para mantener el asfalto a 180 °C, una vez controlada la temperatura se añade la cantidad de ELVALOY, obtenido de la ecuación. Este polímero se adiciono lentamente, en un rango de tiempo de 10 -15 minutos. Una vez incorporada el polímero se deja durante 90 minutos a que se disperse. Pasado el tiempo de dispersión, se adiciono el PPA, dado por la ecuación 11, para lograr la unión química entre el polímero y el asfalto durante un tiempo de 30 minutos.

$$W_{Elvaloy} = (\%Elvaloy) (WA) / 100 \quad \text{Ec. (10)}$$

$$W_{PPA} = (\%PPA) (WA) / 100 \quad \text{Ec. (11)}$$



Donde:

WElvaloy: peso de Elvaloy a adicionar

WPPA: peso de ácido polifosfórico a adicionar

%Elvaloy: Porcentaje de ELVALOY a adicionar.

WA: Peso del asfalto



Figura 3. 1 Adición y remezclado

En la Figura 3.2 podemos observar cómo se comporta el asfalto después de a velo mezclado con su diferente polímero.

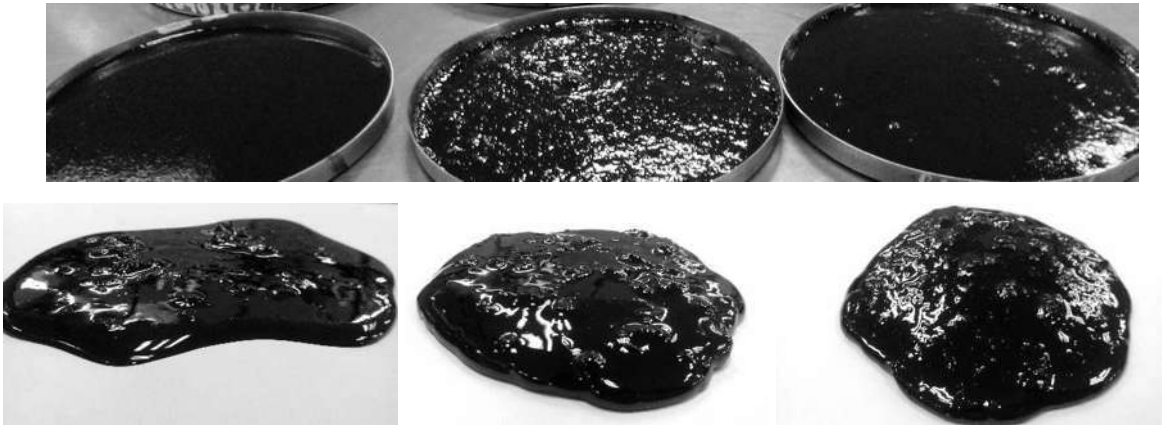


Figura 3. 2 manejabilidad de los diferentes asfaltos

### 3.1.2 Proceso de mezclado de hule

Inicialmente se precalienta el asfalto a una temperatura de 180 °C de tal manera que se encuentre fluido, posteriormente se vierte y pesa una cantidad apropiada del cemento asfáltico en una lata, la cual se coloca sobre una parrilla para mantener el asfalto a 180 °C, una vez controlada la temperatura se añade la cantidad de Hule, se adiciono lentamente, en un rango de tiempo de 10 -15 minutos. Una vez incorporada se deja durante 90 minutos a que se adhiera el asfalto con el Hule.

Cabe mencionar que se trabajó con 4% de hule retenido en la malla #100

$$WHule = (\%Hule) (WA) / 100 \quad EC. (12)$$

DONDE:

WHule: peso de hule a adicionar  
%Hule: Porcentaje de Hule a adicionar.  
WA: Peso del asfalto

### 3.2. EVALUACIÓN DE ACUERDO A LAS NORMAS N·CMT·4·05·001/06. Y N·CMT·4·05·002/06

- Penetración a 25°C M·MMP·4·05·006.
- Ductilidad a 25°C M·MMP·4·05·011.
- Punto de reblandecimiento M·MMP·4·05·009
- Recuperación elástica por torsión M·MMP·4·05·024
- Recuperación elástica en ductilómetro M·MMP·4·05·026
- Separación de polímero M·MMP·4·05·022





En las Tablas siguientes se presentan los resultados obtenidos de las propiedades físicas de los ensayos realizados al asfalto Ekbe. Elvaloy 1.1%/PPA 0.15, Elvaloy 1.2%/PPA 0.10, Hule 4% y se agregó en el análisis del material asfáltico de base (SBS) para determinar la influencia de la incorporación de los polímeros.

Tabla 3. 2 Propiedades físicas EKBÉ

RESULTADOS		Muestra:		EKBÉ REFINERIA SALAMANCA		
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Penetración	M·MMP·4·05·006/00.	25 °C	Pn	67.00	mm	40mm/ min
Punto de reblandecimiento	M·MMP·4·05·009/00.	N/A	Pr	50.50	°C	55°C/min
Ductilidad	M·MMP·4·05·011/07	25 °C	Re	59.00	cm	N/A
Recuperación elástica por torsión	M·MMP·4·05·024·02	25 °C	Ret	8.00	°C	35%/min
Recuperación elástica en ductilómetro	M·MMP·4·05·026	25 °C	Red	65.00	mm	60cm/min
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.031	N/A	

Tabla 3. 3 Propiedades físicas Elvaloy 1.1%/0.15%PPA

RESULTADOS		Muestra:		ELVALOY 1.1% PPA 0.15%		
Propiedades Físicas						



Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Penetración	M·MMP·4·05·006/00.	25 °C	Pn	38.00 mm	40mm/ min
Punto de reblandecimiento	M·MMP·4·05·009/00.	N/A	Pr	53.40 cm	55°C/min
Ductilidad	M·MMP·4·05·011/07	25 °C	Re	48.60 cm	N/A
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Ret	32.00 °	35%/min
Recuperación elástica en ductilómetro	M-MMP-4-05-022	25 °C	Red	57.00 cm	60cm/min
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.031	N/A

Tabla 3. 4 Propiedades físicas Elvaloy 1.2%/0.10PPA

RESULTADOS		Muestra:		ELVALOY 1.2/ 0.10%PPA		
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Penetración	M·MMP·4·05·006/00.	25 °C	Pn	4.60 mm	40mm/ min	
Punto de reblandecimiento	M·MMP·4·05·009/00.	N/A	Pr	59.75 °C	55°C/min	
Ductilidad	M·MMP·4·05·011/07	25 °C	Re	53.00 cm	N/A	
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Ret	41.40 °C	35%/min	
Recuperación elástica en ductilómetro	M-MMP-4-05-022	25 °C	Red	62.00 mm	60cm/min	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.028	N/A	

Tabla 3. 5 Propiedades físicas HULE –RET

RESULTADOS		Muestra:		HULE-RET100-4%		
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma		Parámetro	Resultado	Especificación	



		Temperatura de prueba			
Condición original					
Penetración	M·MMP·4·05·006/00.	25 °C	Pn	34.00 Cm	30mm/min
Punto de reblandecimiento	M·MMP·4·05·009/00.	N/A	Pr	58.20 °C	57°C/min
Ductilidad	M·MMP·4·05·011/07	25	Re	35.00 Cm	N/A
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Ret	39.15 %	40%/min
Recuperación elástica en ductilómetro	N·CMT·4·05·002	25 °C	Red	56.40 Mm	55cm/min
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.025	N/A

Tabla 3. 6 Propiedades físicas SBS

RESULTADOS		Muestra:		SBS		
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado		Especificación
Condición original						
penetración	M·MMP·4·05·006/00.	25 °C	Pn	55.50	mm	40mm/ min
Punto de reblandecimiento	M·MMP·4·05·009/00.	N/A	Pr	60.25	°C	55°C/min
Ductilidad	M·MMP·4·05·011/07	25 °C	Re	52.00	cm	N/A
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Ret	55.50	%	35%/min
Recuperación elástica en ductilómetro	N·CMT·4·05·002	25 °C	Red	65.30	mm	60cm/min
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G <sub>b</sub>	1.010		N/A



### 3.2.1 Penetración a 25°C M·MMP·4·05·006.

La Figura 3.2 Presenta los resultados del ensayo de penetración donde se puede apreciar que en un asfalto convencional tienen un parámetro del 60mm como mínimo y un asfalto modificado Tipo I y II tiene un 40mm, para el hule de llanta es de 30 mm. De los resultados obtenidos se puede observar que sólo el asfalto con 1.1% de Elvaloy no cumplió con los requerimientos establecidos en la especificación.

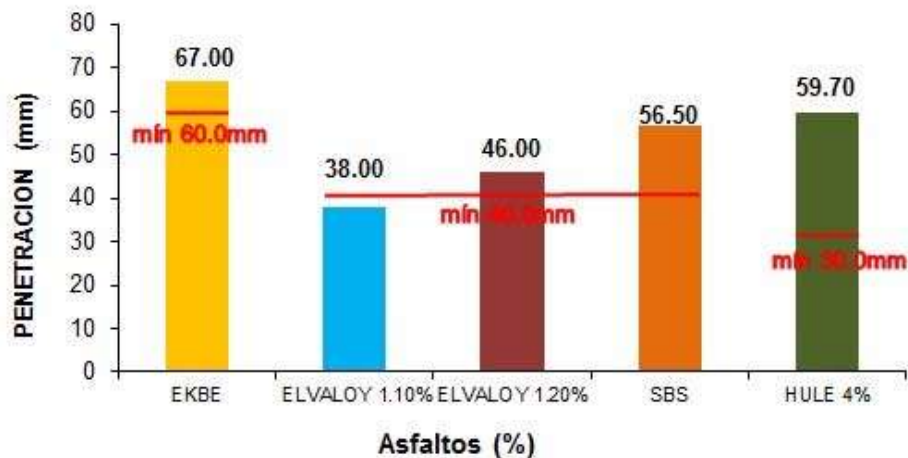


Figura 3. 3 Penetración a 25°C

### 3.2.2 Ductilidad a 25°C M·MMP·4·05·011.

La Figura 3.3 presenta los resultados del ensayo de ductilidad, en el cual se observa que el asfalto Ekbé tiene una ductilidad de 59.0 cm y por lo cual cumple con el criterio mínimo. El ensayo de ductilidad se realiza solamente en asfaltos sin modificadores (originales), por lo cual, los ensayos en los asfaltos modificados fueron realizados con fines de comparación.

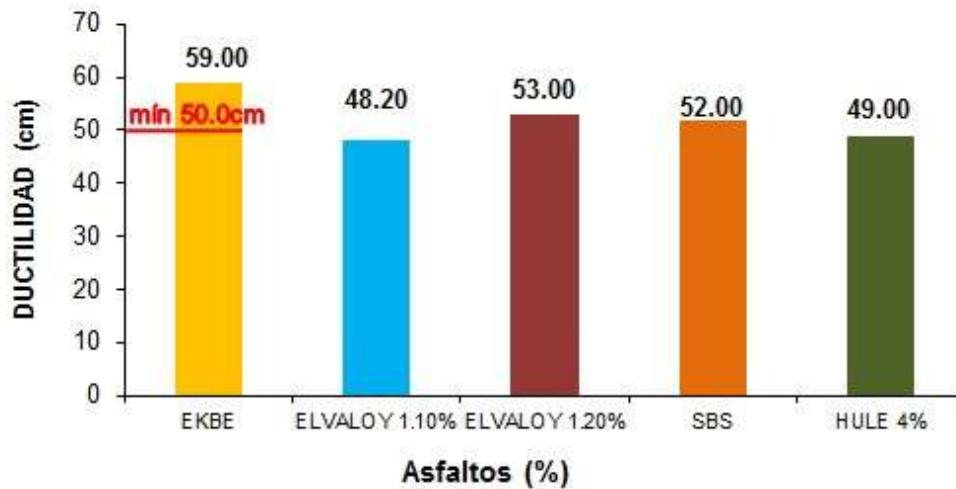


Figura 3. 4 Ductilidad a 25°C

### 3.2.3 Punto de reblandecimiento M·MMP·4·05·009

La Figura 3.4 Presenta los resultados del ensayo de punto de reblandecimiento donde se puede apreciar que el asfalto Ekbe se obtiene un resultado que cumple con la especificación. Cuando se incorpora el Elvaloy se puede observar que con la concentración de 1.1% y PPA 0.15% el asfalto no cumple con la especificación, sin embargo, al aumentar la concentración de ELVALOY a 1.2% y bajar el PPA a 0.10%, el asfalto cumple con la especificación. En lo que respecta al Hule de llanta, se obtuvo una temperatura de 56.2°C, la cual es inferior al valor mínimo requerido en la especificación.

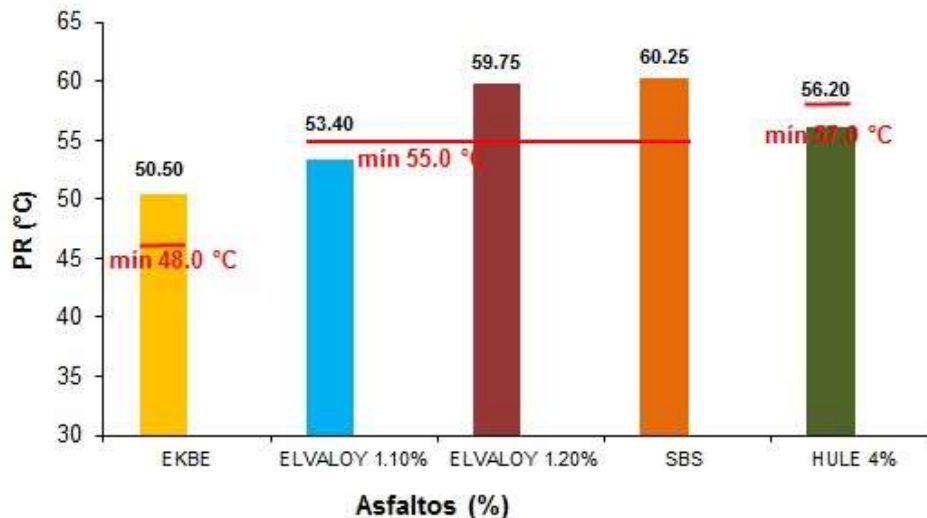


Figura 3. 5 Punto de reblandecimiento



### 3.2.4 Separación del polímero M·MMP·4·05·022

La Figura 3.5 presenta los resultados del ensayo de separación del polímero, donde se puede apreciar que el valor obtenido del ensayo de punto de reblandecimiento de la parte superior del tubo fue de 51.8° C y de 52.0°C para la parte inferior. Por lo cual la diferencia entre estas dos mediciones es de 0.2° C, concluyendo que el asfalto modificado no presentó ninguna separación del polímero durante el proceso, ya que la diferencia máxima permitida en la especificación es de 2.0° C.

Para los asfaltos modificados con ELVALOY y SBS no se realizaron los ensayos de separación, ya que estos tipos de polímeros no presentan problemas de separación (cuando son incorporados adecuadamente).

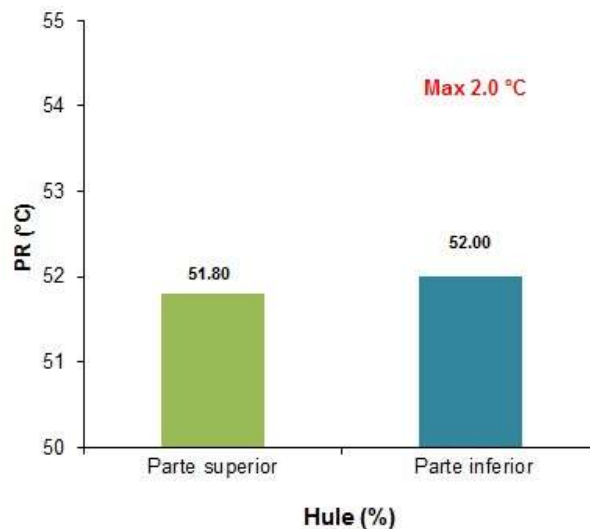


Figura 3. 6 Separación del polímero

### 3.2.5. Recuperación elástica por torsión (M·MMP·4·05·024)

La Figura 3.6 presenta la recuperación elástica por torsión, se observa que solamente los asfaltos con 1.2% de ELVALOY y con SBS cumplieron con el valor establecido en la especificación. Como se sabe, este ensayo se sirve para establecer si hay polímero en el asfalto modificado, pero no puede determinar si la concentración o el desempeño mecánico son adecuados. Por lo cual, el valor de referencia no debería ser tomado como un criterio de rechazo del material asfáltico, ya que esta referencia depende de del porcentaje y tipo de polímero utilizado por lo cual no puede ser fija, lo recomendable es que este valor sea un dato de referencia en el control de calidad del material.

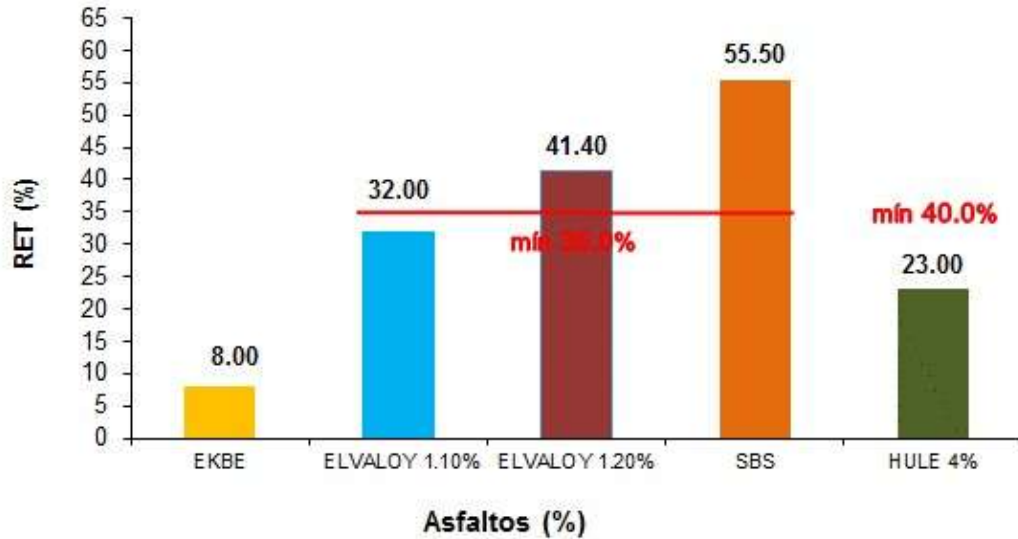


Figura 3. 7 Recuperación elástica por torsión

### 3.2.6 Recuperación elástica en ductilómetro M-MMP-4-05-026

Según la norma de la SCT N-CMT-4-05-002/06, establece que un asfalto modificado debe cumplir con una recuperación mínima de 60mm para asfaltos con polímeros y de 55 para asfaltos con hule de llanta. De los resultados obtenidos se puede observar que el único asfalto que no cumple con la especificación es el ELVALOY con concentración de 1.1%.

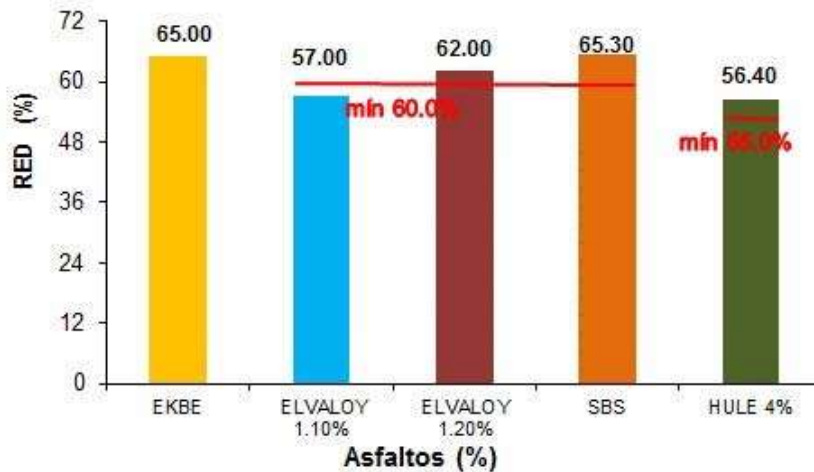


Figura 3. 8 Recuperación elástica en ductilómetro



## CONCLUSIONES

Se observa primeramente que el asfalto de referencia cumple con los requerimientos de las especificaciones. En cuanto a los asfaltos modificados se puede apreciar que las propiedades fueron mejorando conforme se le adicionó el polímero, cabe mencionar que el asfalto con 1.10E/0.10PPA y Hule no cumplieron con las especificaciones de la SCT en las gráficas se pudo apreciar claramente sin embargo no hubo problemas con la trabajabilidad del polímero.

### 3.3. EVALUACIÓN DE ACUERDO A NORMA N·CMT·4·05·004/08

- Viscosidad Rotacional (ASTM D4402-12)
- Propiedades Reológicas en reómetro de corte dinámico (DSR) RTFO Y PAV( ASTM D7175-08)
- Horno rotatorio de película delgada (RTFO) ASTM D2872 -04 RTFO
- Vasija de envejecimiento a presión (PAV) ASTM D6521-08
- Rigidez en reómetro de viga a flexión (BBR) ASTM D6648-08
- Adicionalmente se realizó el ensayo de densidad ASTM D70-09

En las Tablas siguientes se presentan los resultados de los ensayos realizados al asfalto EKBÉ, Elvaloy 1.1%/PPA 0.15, Elvaloy 1.2%/PPA 0.10, Hule 4% y SBS

Tabla 3. 7 Grado PG EKBÉ

Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	$\eta$	0.497 Pa·s	$\leq 3$ Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	2.076 kPa	$\geq 1$ kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.442 %	$\leq 1.0\%$





Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	70 °C	G*/senδ	kPa	≥ 2.2 kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	G*(senδ)	2.9285 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	75.450 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.328	≥ 0.300
Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:					
<b>PG 64 - 16</b>					

Tabla 3. 8 Grado PG Elvaloy 1.1% PPA0.15

Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	1.039 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*/senδ	1.285 kPa	≥ 1 kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.351%	≤ 1.0%
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*/senδ	3.05 kPa	≥ 2.2 kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	G*(senδ)	4129.0 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	70.950 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.318	≥ 0.300
Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:					
<b>PG 82 - 16</b>					



Tabla 3. 9 Grado PG Elvaloy 1.2% PPA0.10

Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	$\eta$	0.981 Pa·s	$\leq 3$ Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.655 kPa	$\geq 1$ kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.373%	$\leq 1.0\%$
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	2.75 kPa	$\geq 2.2$ kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	19 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	4547.5 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-16 °C	S	71.000 MPa	$\leq 300$ MPa
			m	0.332	$\geq 0.300$

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:

**PG 76 - 16**

Tabla 3. 10 Grado PG Hule-Ret100-4%

Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	$\eta$	0.669 Pa·s	$\leq 3$ Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.230 kPa	$\geq 1$ kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.388%	$\leq 1.0\%$
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	2.795 kPa	$\geq 2.2$ kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	3960.3 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	62.85 MPa	$\leq 300$ MPa
			m	0.3175	$\geq 0.300$

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:

**PG 76 - 16**



Tabla 3. 11 Grado PG SBS

Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	$\eta$	1.110 Pa·s	$\leq 3$ Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.38 kPa	$\geq 1$ kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.280%	$\leq 1.0\%$
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	2.5 kPa	$\geq 2.2$ kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C	N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	3945.6 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-12 °C	S	57.250 MPa	$\leq 300$ MPa
			m	0.330	$\geq 0.300$
Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:					
<b>PG 76 - 16</b>					

### 3.3.1 Viscosidad rotacional.

En la Figura 3.8 se observan los resultados de la viscosidad rotacional,  $\eta$ , a 135°C, los cuales no sobrepasan el valor máximo establecido por la normativa para Grado PG (3 Pa.s). En lo que se refiere a los asfaltos modificados con polímero se observa que los valores de viscosidad son similares y no hay diferencias significativas entre ellos.

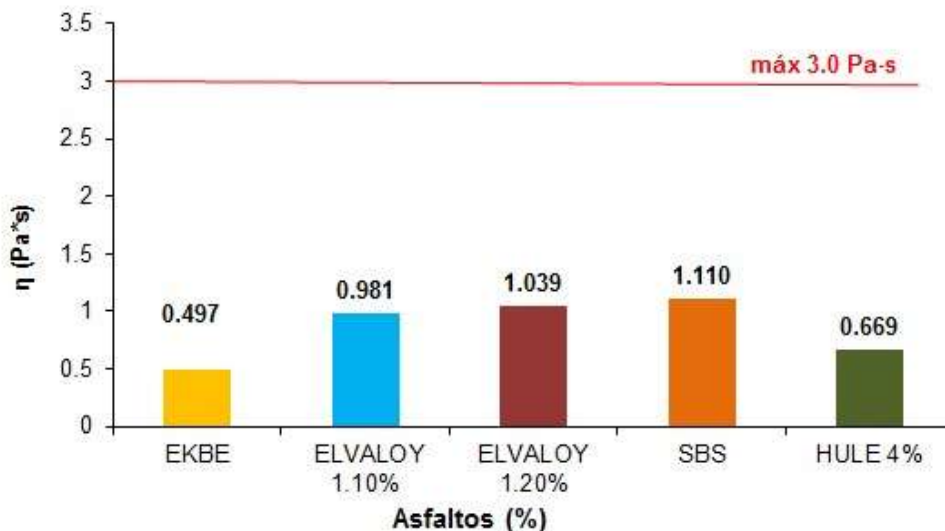


Figura 3. 9 Viscosidad rotacional



### 3.3.2 DSR en condición original

En la Figura 3.9 se presentan los resultados del ensayo en el DSR en condición original evaluados a diferentes temperaturas (64°C a 88°C). Inicialmente, se puede observar que hay un incremento del valor de  $G^*/\text{sen } \delta$  al incorporar los polímeros o el hule de llanta. Comparando los asfaltos modificados con ELVALOY se observa que la concentración de 1.1% tiene una resistencia mayor.

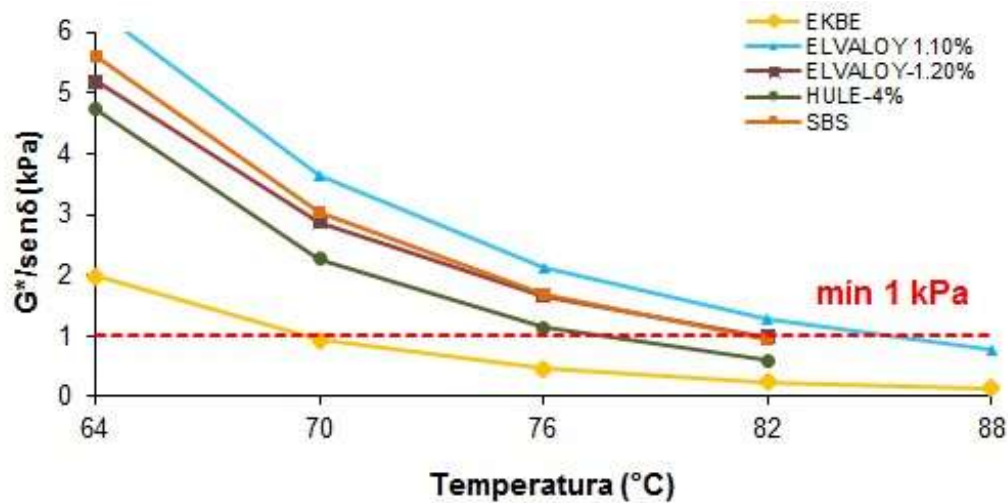


Figura 3. 10 Corte dinámico en condición original

### 3.3.3 Ángulo de fase

En la Figura 3.10 muestra el ángulo de fase, que disminuye con la concentración de Elvaloy lo cual indica un incremento en la proporción elástica del asfalto. Esto se traduce en que el asfalto con 1.1% de ELVALOY tiene un comportamiento más rígido que la concentración de 1.2%

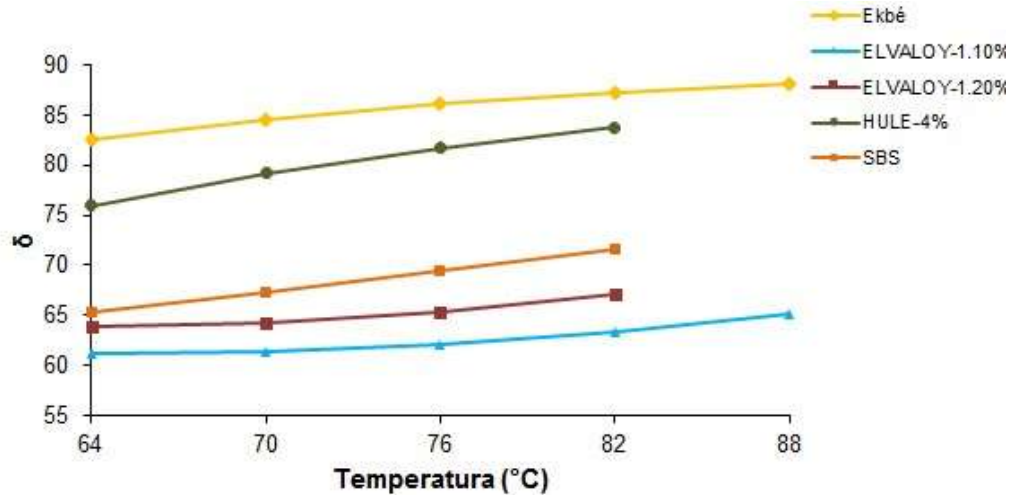


Figura 3. 11 Curva de ángulo de fase

### 3.3.4 Módulo de corte dinámico ( $G^*$ )

La Figura 3.11, presenta la curva de módulo de corte dinámico ( $G^*$ ), el valor de  $G^*$  es una medida de la resistencia total de un material a deformación cuando se expone repetitivamente a presiones de corte. Se observa que al asfalto con 1.1% de ELVALOY tiene los valores más altos de  $G^*$  para todas las temperaturas evaluadas.

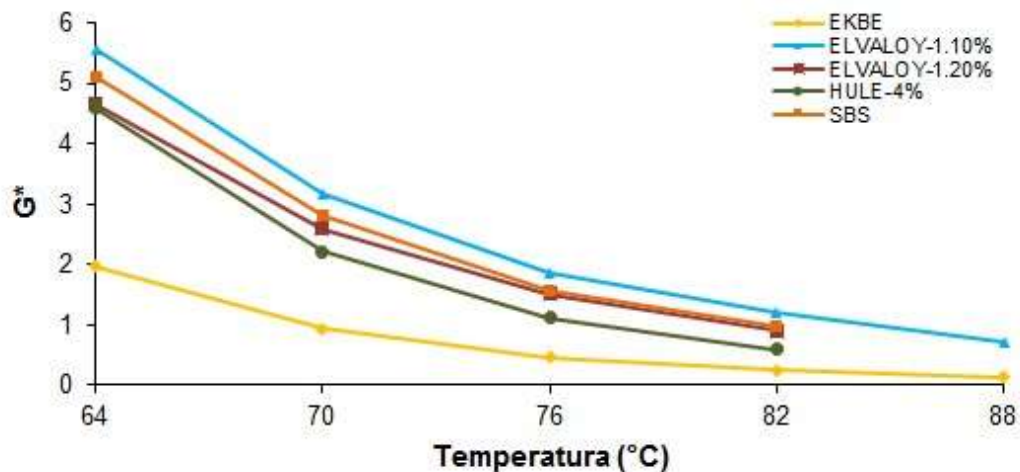


Figura 3. 12 Curva de módulo de corte dinámico

### 3.3.5 Cambio de masa después de envejecimiento (RTFO)

Para el cambio de masa, se realizó el envejecimiento por RTFO, según la norma ASTM D2872 el cambio de masa será de 1% como máximo. En el ensayo se observó que todos los asfaltos cumplieron con el criterio establecido (Figura 3.12).

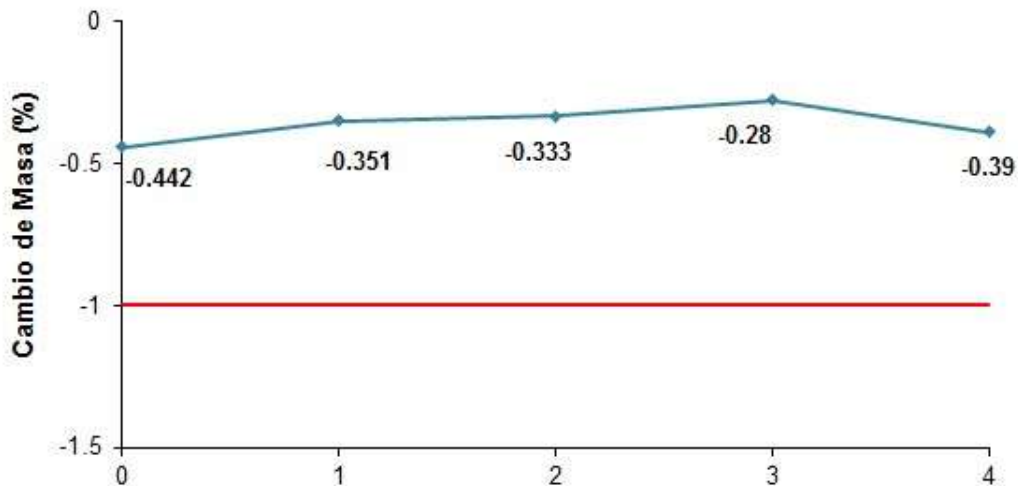


Figura 3. 13 Cambio de masa después de envejecimiento (RTFO)

### 3.3.6 Reómetro de corte dinámico después de RTFO

En la Figura 3.13 muestra los resultados del DSR después de RTFO en cuanto al parámetro de deformación de  $G^*/\sin\delta$ . La resistencia del asfalto generalmente aumenta (criterio mínimo de 2.2 kPa). Se observa que el PG del asfalto original es 64°C y con la adición de los polímeros y hule de llanta aumento a 76°C, a excepción del asfalto con 1.1% de ELVALOY el cual subió hasta 82°C.

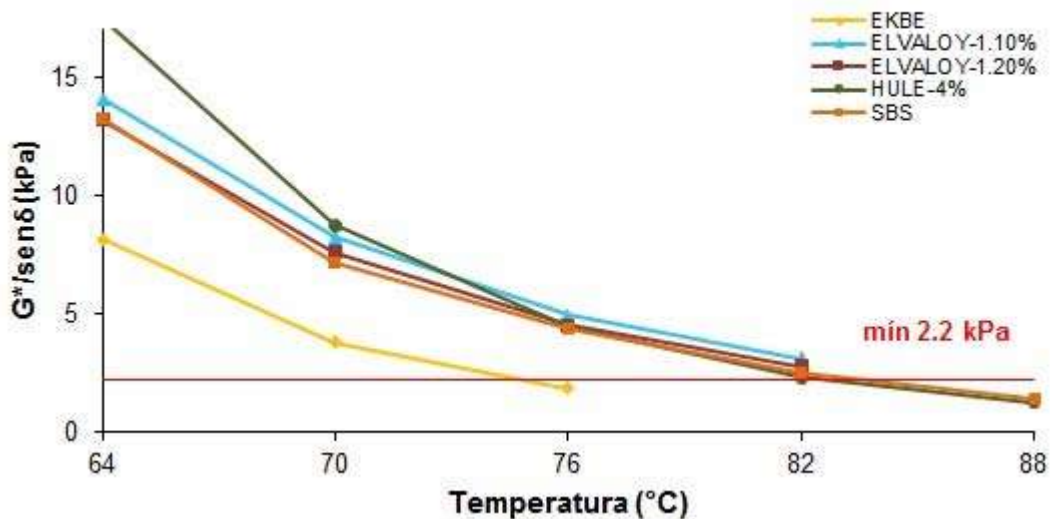


Figura 3. 14 Corte dinámico después de RTFO

### 3.3.7 Ángulo de fase después de RTFO

El ángulo de fase no cambio mucho en los asfaltos con Elvaloy a diferencia con el SBS el cual bajo un (%) mínimo, esto es razonable debido que el envejecimiento evapora



compuestos más ligeros del asfalto y hace que el asfalto se vuelva más elástico. Según la norma ASTM D2872 establece que para asfaltos modificados el ángulo de fase a 76°C debe ser como máximo 75, por lo tanto, todos los asfaltos cumplen con este criterio.

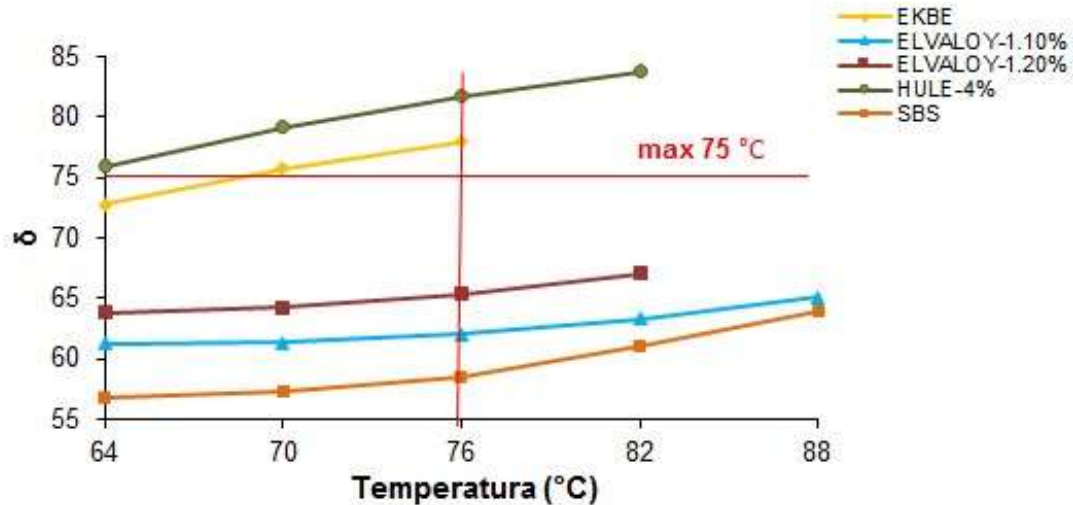


Figura 3. 15 Ángulo de fase después de RTFO

### 3.3.8 Módulo de corte dinámico después de RTFO

En la Figura 3.15 Se muestra el módulo de corte, que ha aumentado después del envejecimiento en RTFO, esto debido que hay un incremento en la rigidez del asfalto.

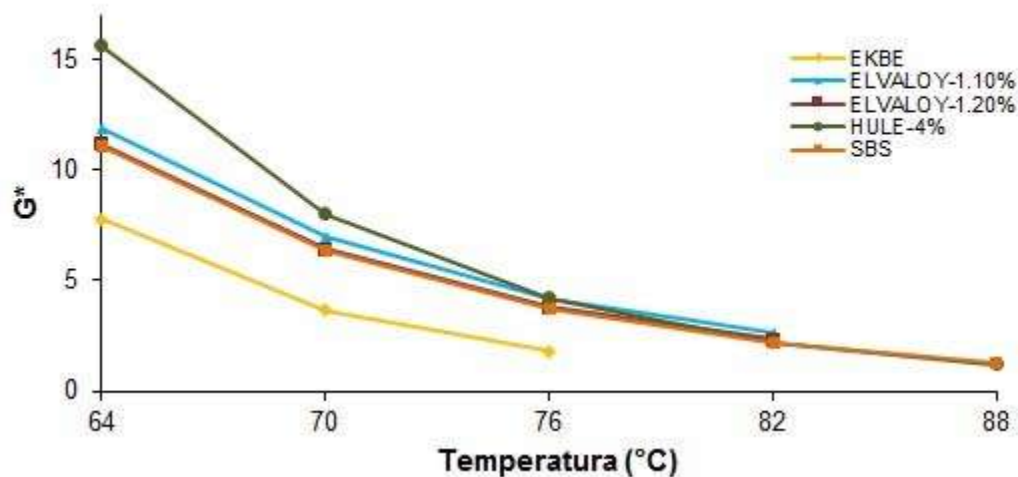


Figura 3. 16 Módulo de corte dinámico después de RTFO



### 3.3.9 Corte dinámico después de PAV

En la Figura 3.16 muestra el  $G^*/\text{sen}\delta$  después de PAV, el criterio máximo es de 5000 kPa. Se observa que la temperatura de falla del asfalto original es de 22°C, en lo que se refiere a los asfaltos modificados se observa un incremento en la temperatura de falla, llegando hasta 28°C para el asfalto modificado con Hule de llanta. Sin embargo, el asfalto con 1.1% de Elvaloy no presentó un aumento en su temperatura de falla, quedando en 22°C.

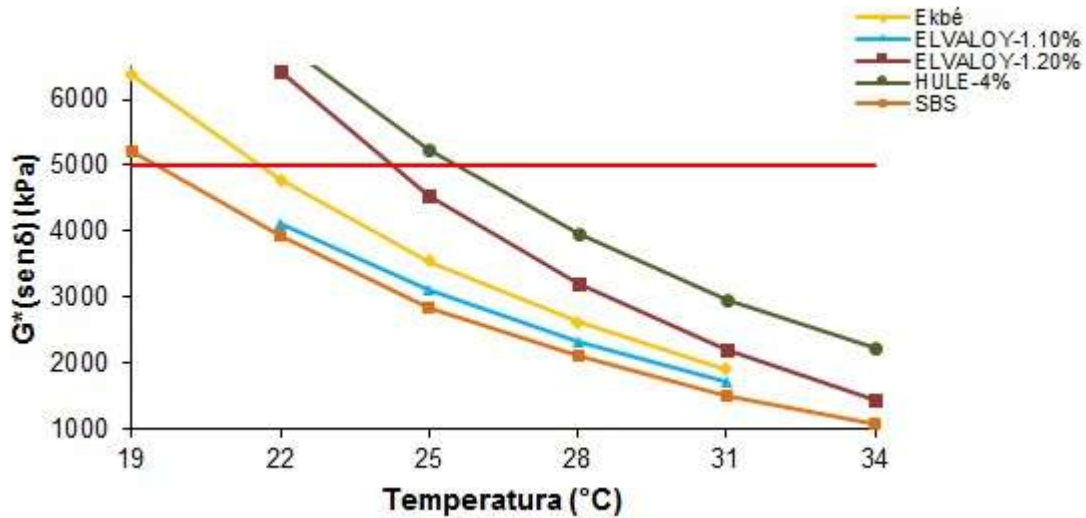


Figura 3. 17Corte dinámico después de PAV

### 3.3.10 Ángulo de fase después de PAV.

El ángulo de fase se muestra similar en los diferentes porcentajes de Elvaloy; significa que no hay mucha diferencia en la parte visco-elástica.



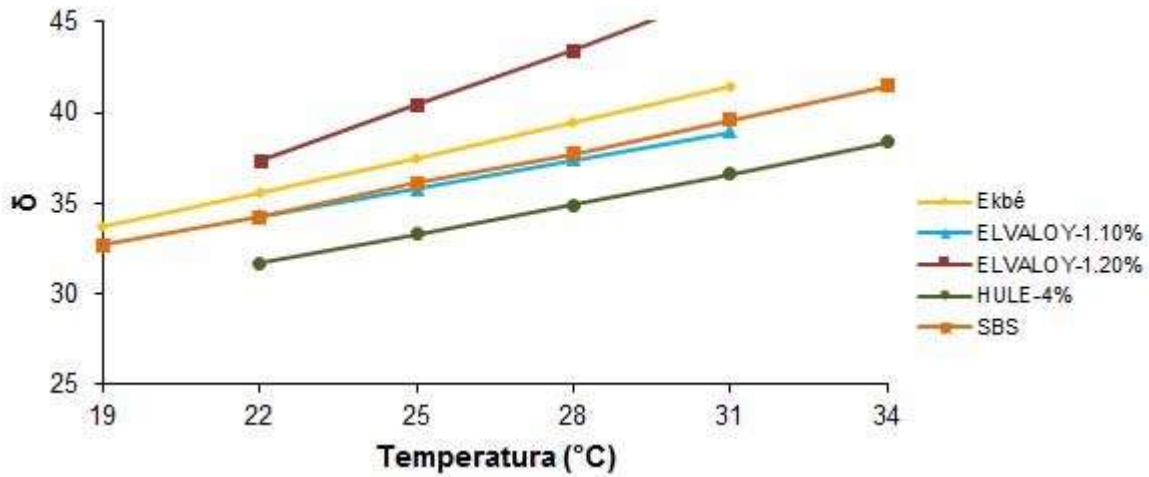


Figura 3. 18 Corte dinámico en condición original

### 3.3.11 Curva de la pendiente del ensayo de BBR

En la Figura 3.18 muestra la pendiente de la curva rigidez-tiempo del ensayo de BBR a dos temperaturas, (-6 y -12 °C). Se observa que la temperatura a -6 °C es la cumple con el criterio de la pendiente mínima (0.3)., se puede concluir que la adición de estos polímeros no mejoró la temperatura baja del PG del asfalto original.

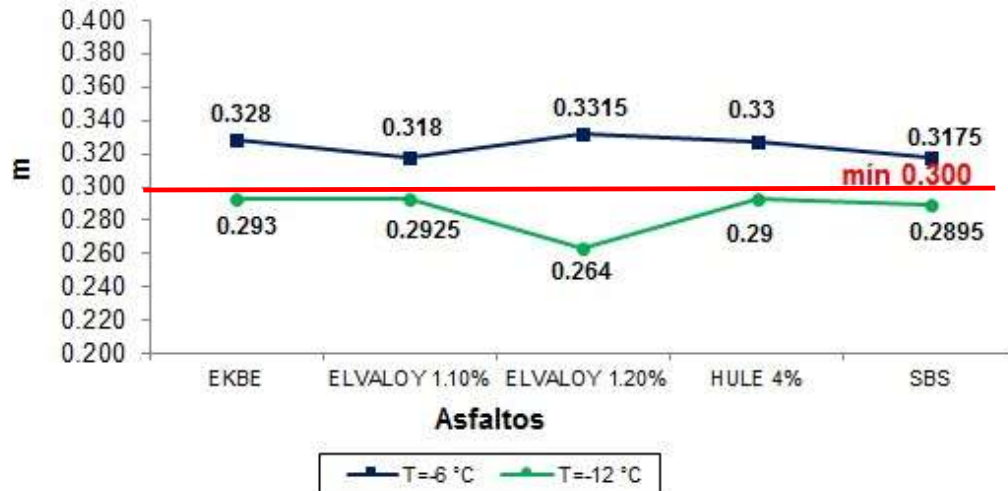


Figura 3. 19 Pendiente



### 3.3.12 Curva rigidez-tiempo del ensayo de BBR

Del mismo modo en la Figura 3.19 se observa cómo la inclusión del Elvaloy no modifica la rigidez del ligante a distintas temperaturas. Para los otros asfaltos se observa una ligera disminución de los valores de rigidez.



Figura 3. 20 Rigidez

### 3.3.13 Grado PG por cada porcentaje de asfalto

En la figura 3.20 se muestra la variación de grado PG con los diferentes porcentajes de aditivo, así como en la Tabla 3.11. Como se puede observar el 1.20 Elvaloy tiene un PG superior a los demás con un PG 82.

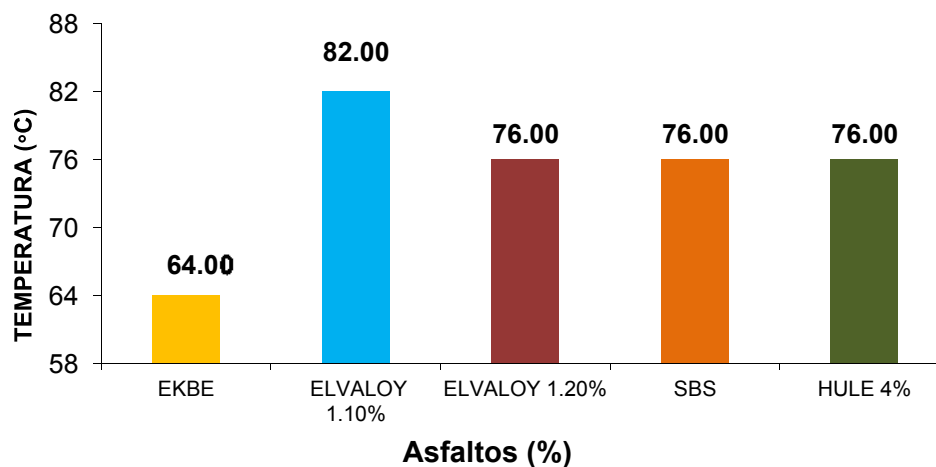


Figura 3. 21 Variación del PG con los diferentes porcentajes de aditivo



Tabla 3. 12 Asfaltos por grado PG

ASFALTO	GRADO PG	
EKBE	64	-16
ELVALOY 1.10%	82	-16
ELVALOY 1.20%	76	-16
HULE 4%	76	-16
SBS	76	-16



## CONCLUSIONES

Al evaluar el asfalto con los diferentes porcentajes de polímero y hule no parecen haber diferencias significativas en el comportamiento de los materiales asfálticos modificados, ya que en la mayoría de los asfaltos modificados se obtuvo un PG 76-16. Siendo solamente el asfalto con 1.1% de Elvaloy y 0.15% de PPA el que obtuvo un PG superior (PG 82-16).

En lo que se refiere al envejecimiento del asfalto con Elvaloy, pareciera que este tipo de polímero ayuda tiene tendencia a envejecer menos el asfalto. Sin embargo, las evaluaciones realizadas no son suficientes para confirmar este comportamiento.

Aunque el Hule cumple hay que recordar que tiene problemas de separación.

La temperatura mínima recomendable quedaría con  $-16^{\circ}\text{C}$ , debido a que el asfalto no sufrió modificación en las temperaturas bajas con la inclusión de los polímeros o el hule de llanta.

El asfalto con ELVALOY 1.1%, obtuvo un PG 82-16 y cumple con los requerimientos de la especificación del Grado PG, sin embargo, cuando se evaluó con respecto a la norma N·CMT·4·05·002/06 este asfalto no cumplía con algunos ensayos de la especificación, siendo que los parámetros en los que no se cumplió evaluaban propiedades de elasticidad del asfalto. Por lo cual, es recomendable reflexionar si los valores establecidos en la especificación son los adecuados para este tipo de asfaltos. Hay que realizar ensayos adicionales para poder establecer un criterio más certero con respecto a estas especificaciones.

Concluyendo si es necesario el uso de modificadores de asfalto, se debe elegir de forma cautelosa el material o producto a emplear, tomando en cuenta todas y cada una de las características que hacen de una obra civil en una estructura productiva en todos los sentidos.



### 3.4. EVALUACIÓN DE ACUERDO A NORMA CREPP + N·CMT·4·05·004/18

Los resultados obtenidos del ensayo del MSCR a 76 °C se muestra en la tabla 3.12, con base a estos resultados se observa que el Elvaloy 1.2%/0.1P muestra un mejor comportamiento, el porcentaje de recuperación a 3.2 kPa es de 74.6, y su clasificación es de extremadamente alto; mientras el peor comportamiento lo tiene el Ekbe (asfalto base). Se corrobora con la figura 3.21 (Esfuerzo vs Deformación).

En conclusión, el ELVALOY mejora las propiedades del asfalto base (Ekbe).

Tabla 3. 13 Análisis MSCR-ASTM D7045.

RESULTADO	UNIDAD	EKBE	ELVALOY 1.1%/0.15PPA	ELVALOY 1.2%/0.10PPA	HULE 4%	SBS
R0.1	%	7.90%	72.35%	78.26%	32.85%	59.07%
R3.2	%	0.00%	64.56%	74.68%	6.69%	38.52%
Rdiff	%	100.00%	10.76%	4.57%	79.64%	34.79%
Jnr 0.1	kPa	3.9816	0.2731	0.1196	1.0298	1.0894
Jnr 3.2	kPa	5.4845	0.3119	0.1303	1.7842	1.5419
Jnr diff	%	37.75%	14.19%	8.91%	73.25%	41.54%
<b>Grado PG</b>		64	82	76	76	76
<b>Clasificación</b>			E	E	H	H

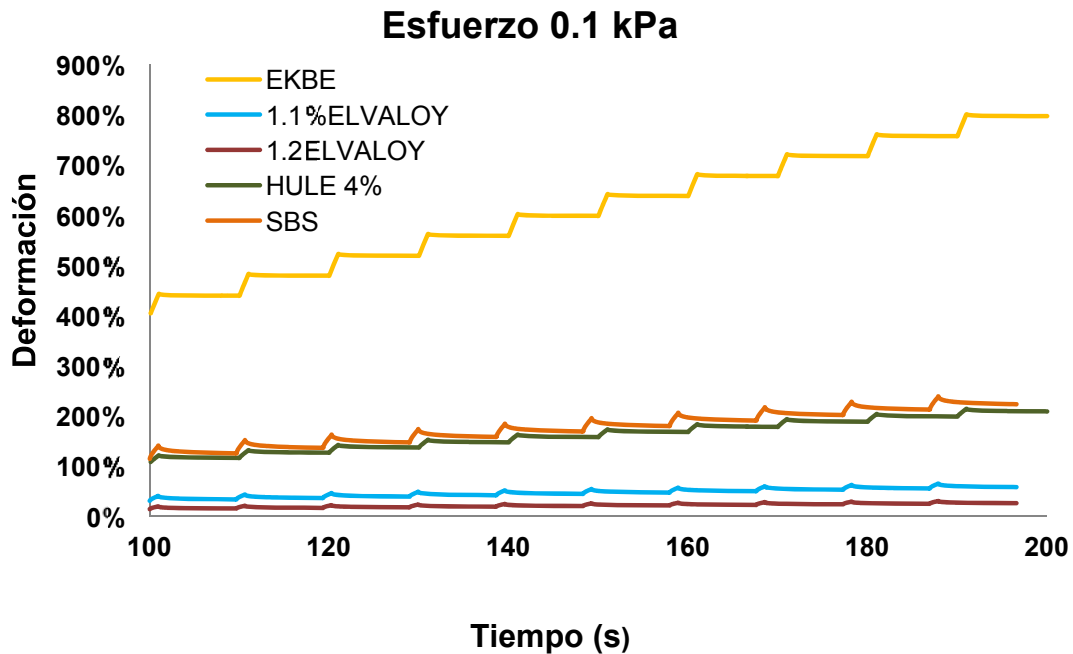




Figura 3. 22 Esfuerzo 0.1 kPa

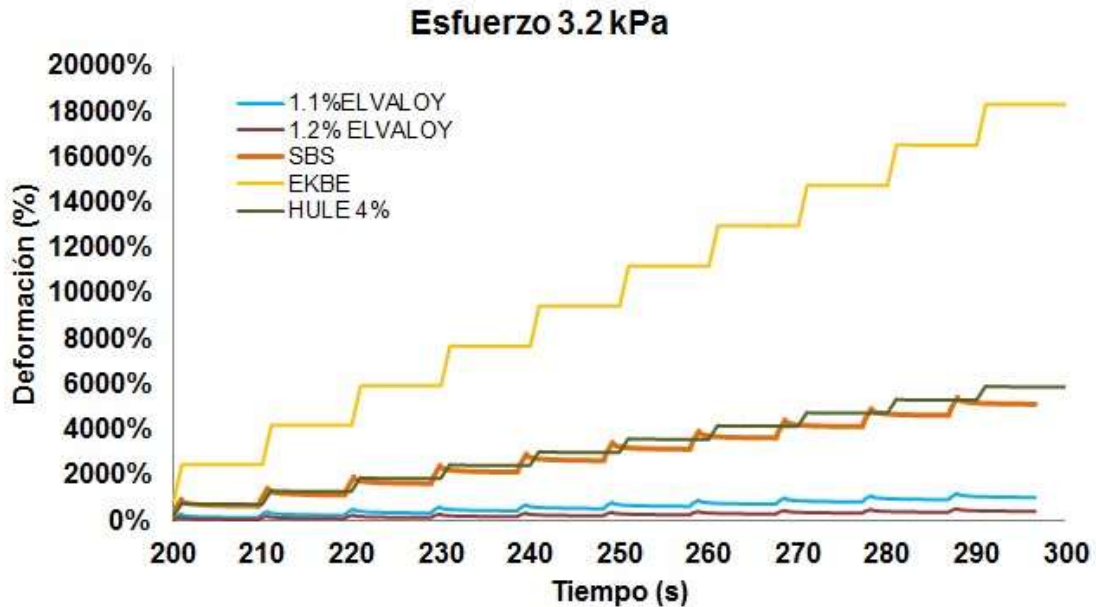


Figura 3. 23 Esfuerzo 3.2 kPa

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se observa que el asfalto modificado con Elvaloy presenta una menor acumulación de deformación permanente. Lo cual significa que tiene un mejor comportamiento a temperaturas altas y/o cargas extremas. Esto se asocia a que este tipo de polímero rigidiza el asfalto, por lo cual, es importante evaluar su comportamiento a la fatiga, ya que podría reducir significativamente esta propiedad del asfalto.

Después de realizar la evaluación completa de los asfaltos, se pudo observar que las propiedades que no se cumplieron en la Norma N·CMT·4·05·002/06, no tienen una influencia significativa en el comportamiento mecánico del asfalto modificado. Por lo cual, se debe reflexionar sobre los valores establecidos en la norma, ya que en la mayoría de los casos están establecidos para una cierta concentración de polímero y no basados en criterios de desempeño.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Institute, A. (2012). *Asphalt Binder Testing* (Tercera ed.). Estados Unidos de America: Asphalt Institute .
2. Carlos Alfonso Cuadro Causil, J. I. (2012). *Construcción de las curvas maestras del Mástic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y de muestras recuperadas de mezclas en servicio*. Bogotá : Pontificia Universidad JAVERIANA.
3. SCT. (2006). *N-CMT-4-05-001. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG*. México, DF.
4. Kennedy, T. W. (1994). The product of the SHRP asphalt research program. *Superior Performing asphalt pavements (Superpave)*.
5. Kim, Y. R. (2009). *Constructing the dynamic modulus mastercurve using impact resonance testing*. . Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists .
6. [http://www.e-asphalt.com/orig\\_asf/historia\\_del\\_asfalto.htm](http://www.e-asphalt.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm). (s.f.).
7. Asphalt Institute. (1998). *Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de Superpave: Traducción del IPC*. Buenos Aires: IPC.
8. SCT. (2006). *N-CMT-4-05-002. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Calidad de los materiales Asfálticos Modificados*. México, DF.
9. ASTM D36/D36M. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. West Conshohocken. PA: ASTM International.
10. SCT-M-MMP-4-05-024. (2002). *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Recuperación Elástica por Torsión en Cemento Asfáltico Modificado*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, DF.
11. ASTM D70. (2009). *Standard Test Method for Density of Semi-solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. West Conshohocken. PA: ASTM International.
12. ASTM D4402/D4402. (2015). *Standart Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. West Conshohocken. PA: ASTM International.
13. ASTM D7175. (2015). *Start Test Method for Determining the Rheological Propierties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. West Conshohocken. PA: ASTM Inernational.
14. ASTM D2872. (2012). *Standart Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. West Conshohocken. PA: ASTM International.



15. ASTM D6521. (2013). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
16. McGraw-Hill. (2014). *Punto de fusión*. Recuperado el 23 de 12 de 2014.
17. SCT-M-MMP-4-05-009. (2000). *Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Punto de Reblandecimiento de Cementos Asfálticos*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, DF.