

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS  
LIGANTES ASFÁLTICOS PRODUCTO DE RAP CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE ADITIVOS REJUVENECEDORES”

ING. YADIRA DIAZ  
AGUILAR

2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS LIGANTES  
ASFÁLTICOS PRODUCTO DE RAP CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE  
ADITIVOS REJUVENECEDORES”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES Y MOVILIDAD

PRESENTA:

ING. YADIRA DIAZ AGUILAR

DIRIGIDO POR:

DRA. MARIA DE LA LUZ PÉREZ REA

CO-DIRIDO POR:

DR. HORACIO DELGADO ALAMILLA

Santiago de Querétaro, Qro. Junio 2026

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Faculta de ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS LIGANTES  
ASFÁLTICOS PRODUCTO DE RAP CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE  
ADITIVOS REJUVENECEDORES”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
maestro en ingeniería de vías terrestres y movilidad

Presenta:  
Ing. Yadira Diaz Aguilar

Dirigida por:  
Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-dirido por:  
Dr. Horacio Delgado Alamilla

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Presidente

Dr. Horacio Delgado Alamilla  
Secretario

Dra. Genoveva Hernández Padrón  
Vocal

Dr. Ricardo Montoya Zamora  
Suplente

M.I Esbeydi Janet Limeta Dionet  
Suplente

## RESUMEN

El Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) corresponde al material obtenido de pavimentos flexibles que han alcanzado el final de su vida útil y que puede reutilizarse en la construcción y rehabilitación de nuevas estructuras de pavimento. Sin embargo, el ligante asfáltico contenido en el RAP se encuentra envejecido y endurecido, condición que incrementa la rigidez de las mezclas asfálticas y las hace más susceptibles a fenómenos de fatiga y agrietamiento térmico. Ante esta problemática, los aditivos rejuvenecedores representan una alternativa viable para reducir la viscosidad del ligante envejecido y restaurar parcialmente sus propiedades originales.

El uso de RAP en mezclas asfálticas en caliente constituye una opción atractiva debido a los beneficios económicos y ambientales asociados con la disminución en el consumo de materiales vírgenes y la reducción en la generación de residuos. Aunque diversas agencias de carreteras permiten contenidos de RAP iguales o superiores al 30 %, su aplicación en altas proporciones continúa siendo limitada debido a la incertidumbre relacionada con el desempeño mecánico y la durabilidad de las mezclas recicladas. No obstante, investigaciones recientes han mostrado que el empleo de rejuvenecedores en mezclas con alto contenido de RAP pueden disminuir la rigidez del material y mejorar su comportamiento.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de aditivos rejuvenecedores Ad-1, Ad-2, Ad-3 y Ad-4 sobre las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico extraído del RAP. Esto se realizará con el propósito de determinar su viabilidad para el diseño de mezclas asfálticas en caliente con 30 % de RAP.

Para ello, el ligante será extraído mediante el equipo Rotarex y posteriormente recuperado mediante rotavapor. Luego, será modificado con distintas concentraciones de los aditivos rejuvenecedores seleccionados, con el fin de analizar su influencia en las propiedades del material e identificar la alternativa que presente el mejor desempeño para su posible incorporación en mezclas asfálticas recicladas.

**Palabras clave:** pavimento asfáltico recuperado, RAP, ligante asfáltico, aditivo rejuvenecedor, mezcla asfáltica en caliente.

## SUMMARY

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) refers to the material obtained from flexible pavements that have reached the end of their service life and can be reused in the construction and rehabilitation of new pavement structures. However, the asphalt binder contained in RAP is aged and hardened, a condition that increases the stiffness of asphalt mixtures and makes them more susceptible to fatigue and thermal cracking. In response to this issue, rejuvenating additives represent a viable alternative to reduce the viscosity of the aged binder and partially restore its original properties.

The use of RAP in hot-mix asphalt is an attractive option due to the economic and environmental benefits associated with reducing the consumption of virgin materials and minimizing waste generation. Although several highway agencies allow RAP contents equal to or greater than 30%, its application in high proportions remains limited due to uncertainty regarding the mechanical performance and durability of recycled mixtures. Nevertheless, recent studies have shown that the use of rejuvenators in mixtures with high RAP content can reduce material stiffness and improve its behavior.

In this context, the present study aims to evaluate the effect of different concentrations of rejuvenating additives Ad-1, Ad-2, Ad-3 and Ad-4 on the physical and mechanical properties of the asphalt binder extracted from RAP. This will be carried out to determine its feasibility for the design of hot-mix asphalt mixtures containing 30% RAP.

To this end, the binder will be extracted using the Rotarex equipment and subsequently recovered using a rotary evaporator. It will then be modified with different concentrations of the selected rejuvenating additives in order to analyze their influence on the material properties and identify the alternative that presents the best performance for possible incorporation into recycled asphalt mixtures.

**Keywords:** reclaimed asphalt pavement, RAP, asphalt binder, rejuvenating additive, hot mix asphalt.

## DEDICATORIAS

A Dios, por darme la vida, la salud, la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de llegar hasta esta etapa tan importante de mi vida. Gracias por acompañarme en cada desafío, por iluminar mi camino, sostenerme en los momentos difíciles y permitirme alcanzar este logro que hoy culmina con la realización de esta tesis.

A mi hermano Jonatan, por su apoyo incondicional, por estar presente en los momentos difíciles y por motivarme a seguir adelante cuando más lo necesitaba. Tu confianza, cariño y respaldo han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mi papá, por darme la vida y por todo lo que, de una u otra forma, ha contribuido a mi formación y crecimiento.

A Arturo, con todo mi amor. Gracias por estar a mi lado durante este camino, por tu amor, paciencia y apoyo incondicional en los momentos de cansancio, incertidumbre y dificultad, siempre encontré en ti una palabra de aliento, una mano que me impulsó a seguir adelante y la confianza necesaria para creer en mí misma. Gracias por permanecer a mi lado incluso en las etapas más difíciles, por celebrar mis logros como si fueran tuyos y por recordarme que era capaz de alcanzar esta meta. Este logro también lleva una parte de ti, a sus papás Ana María y Miguel Ángel, por su cariño, apoyo y por hacerme sentir parte de su familia, por la confianza que siempre me han brindado y, especialmente, por acompañarme y cuidarme durante mi recuperación. Su apoyo y afecto significaron mucho para mí.

A mis abuelas, Indalecia y Griselda, por tenerme siempre presente en sus oraciones, por su cariño incondicional y por cada palabra de aliento que me han brindado a lo largo de mi vida. Su amor y sus bendiciones han sido una fortaleza constante en mi camino.

Y de manera muy especial, a mi mamá, quien hoy se encuentra en el cielo. Aunque tu ausencia ha sido una de las pruebas más difíciles de afrontar, tu amor, tus enseñanzas y los valores que me inculcaste siguen guiando cada uno de mis pasos. Este logro está dedicado a ti, porque gran parte de lo que soy te lo debo a ti. Me gusta pensar que desde donde estés puedes verme y compartir conmigo la alegría

de este momento. Espero que te sientas orgullosa de la persona en la que me he convertido y de esta meta que hoy alcanzo.

Con amor, gratitud y profundo respeto, dedico este trabajo a quienes han sido mi inspiración, apoyo y fortaleza para llegar hasta aquí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de Querétaro, en especial a la Facultad de Ingeniería, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formar parte de la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad. Agradezco a su comunidad académica por contribuir a mi formación mediante la transmisión de conocimientos, experiencias y valores que fortalecieron mi desarrollo profesional y personal. Durante esta etapa tuve la oportunidad de ampliar mis conocimientos, fortalecer mis competencias profesionales y enfrentar nuevos desafíos que contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico. Esta experiencia representa una etapa invaluable en mi vida y uno de los logros más importantes de mi trayectoria profesional, el cual atesoraré siempre con orgullo y gratitud.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado mediante una beca, la cual hizo posible la realización de mis estudios de maestría y contribuyó de manera fundamental al cumplimiento de esta meta académica.

Al Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por facilitar las instalaciones, el equipo y los materiales necesarios para el desarrollo experimental de esta investigación.

A mi directora de tesis, la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su guía, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso, así como por compartir generosamente sus conocimientos y experiencia, fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mi co-director de tesis, el Dr. Horacio Delgado Alamilla, por aceptarme como

tesista en el Instituto Mexicano del Transporte, por la confianza depositada en mí y por sus valiosas enseñanzas, orientación y consejos, que contribuyeron significativamente a mi formación académica y profesional.

A la Dra. Genoveva Hernández Padrón, integrante de mi sínodo, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por sus valiosas observaciones y aportaciones, las cuales enriquecieron y fortalecieron significativamente este trabajo.

Al Dr. Ricardo Montoya Zamora, coordinador de la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad e integrante de mi sínodo, por su acompañamiento constante, disposición y compromiso con la formación académica de sus estudiantes.

A la M.I. Esbeydi Janet Limeta Dionet, integrante de mi sínodo, por su disposición, paciencia y valiosas recomendaciones, las cuales fueron de gran importancia para el desarrollo y mejora de esta investigación.

De manera especial, a la Ing. Imelda Casares Lozada, por su apoyo durante mi estancia en el IMT, por compartir sus conocimientos en las pruebas de laboratorio y por su permanente disposición para orientarme y resolver mis dudas.

Al Dr. Omar Chávez Alegría, por su apoyo en un momento crucial de nuestra formación académica, al brindarnos la oportunidad de continuar nuestros estudios cuando nos enfrentamos a la suspensión de la beca.

Al Dr. Saúl Obregón Biosca, por sus acertadas orientaciones, su disposición para guiarnos y el apoyo que siempre nos brindó durante esta etapa de formación.

A mis compañeras del posgrado, Betsie, Katia y Leslie, por hacer de este camino una experiencia más enriquecedora y agradable, por las risas compartidas, el compañerismo y el apoyo mutuo en los momentos de incertidumbre. En especial a Betsie, porque en ella encontré una amiga invaluable, siempre presente para brindarme su apoyo, escucharme y acompañarme incluso en los momentos más difíciles.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	13
2.	JUSTIFICACIÓN .....	14
3.	HIPÓTESIS .....	15
4.	OBJETIVOS .....	15
4.1	GENERAL.....	16
4.2	ESPECÍFICOS .....	16
5.	MARCO TEÓRICO .....	16
5.1	ANTECEDENTES .....	16
5.1.1	Generalidades del RAP .....	17
5.1.2	Técnicas de reciclado del pavimento flexible.....	18
5.1.3	Mezclas asfálticas en caliente con RAP .....	20
5.1.4	Ligante asfáltico y proceso de envejecimiento .....	21
5.1.5	Asfalto PG .....	22
5.1.6	Ensayos de calidad para asfaltos PG.....	24
5.1.7	Aditivos Rejuvenecedores .....	29
5.1.8	Métodos de extracción del ligante asfáltico de RAP .....	32
5.1.9	Métodos para la separación del asfalto del agregado .....	33
5.1.9.1	Método de ignición .....	34
5.1.9.2	Extracción por Disolvente Método A (Centrifugado) y B (Reflujo) de la Norma ASTM D2172 .....	34
5.1.9.3	Extracción por Centrifugado, Método A.....	35
5.1.9.4	Extracción por Reflujo, Método B .....	36
5.1.10	Métodos de recuperación del ligante asfáltico .....	37
5.1.10.1	Evaporador rotatorio- ASTM D5404.....	38
5.1.10.2	Método Absón- ASTM D 1856 .....	39
5.1.11	Casos de estudio.....	41
6.	METODOLOGIA .....	43

6.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	46
6.1.1	Ligante asfáltico base .....	46
6.1.2	Obtención del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) .....	53
6.1.2.1	Secado en horno a 110°C .....	53
6.1.3	Extracción del ligante asfáltico envejecido (Asf-1) por centrifugado, ASTM D2172 .....	54
6.1.3.1	Proceso de filtrado del residuo .....	55
6.1.4	Recuperación del ligante asfáltico (Asf-1) por el método de Rotavapor, ASTM D 5404 .....	59
6.1.5	Caracterización del ligante asfáltico envejecido (Asf-1) extraído del RAP 61 .....	61
6.1.6	Determinación de las temperaturas críticas del ligante del RAP .....	63
6.1.7	Calculo de temperaturas criticas .....	65
6.1.8	Determinación del grado PG del nuevo asfalto a mezclar a partir de las temperaturas críticas del RAP .....	68
6.1.9	Determinación de grado PG requerido del asfalto nuevo .....	71
6.1.10	Determinación del porcentaje óptimo de aditivo para lograr el asfalto nuevo requerido PG 56.8-12.2 .....	72
6.1.10.1	Módulo reológico de corte dinámico (original). ASTM D7175. ....	73
6.1.10.2	Prueba de MSCR ASTM D 7405-24 (condición original) .....	74
6.1.10.3	Envejecimiento del ligante en horno RTFO. ASTM D2872 .....	76
6.1.11	Módulo reológico de corte dinámico (RTFO). ASTM D7175 .....	78
6.1.10.4	Prueba de MSCR ASTM D 7405-24 (condición RTFO) .....	80
6.1.11	Elaboración de mezclas .....	83
6	DISCUSIÓN .....	87
7	CONCLUSIÓN .....	89
8	LINEAS FUTURAS .....	90
9	LITERATURA CITADA .....	91
10	APENDICE 1 .....	98
11	APENDICE 2 .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Selección del cemento asfáltico para mezclas con RAP.....	18
Tabla 2. 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. ...	23
Tabla 3. Nomenclatura de los materiales durante la etapa de investigación. ....	44
Tabla 4. Propiedades reológicas del ligante extraído del rap (asfalto filtrado). ....	56
Tabla 5. Propiedades reológicas del asfalto extraído del rap (asfalto sin filtrar). ...	57
Tabla 6. Resumen de las pruebas requeridas y del consumo de materiales. ....	61
Tabla 7. Resultados $G^*/\text{sen } \delta$ en asfalto del RAP.....	62
Tabla 8. Resultados ensaye de viga a flexión en BBR. ....	63
Tabla 9. Obtención de temperatura críticas (alta). ....	65
Tabla 10. Temperatura críticas (bajas). ....	66
Tabla 11. Grado PG del asfalto producto de RAP. ....	68
Tabla 12. Temperaturas críticas del nuevo asfalto a utilizar. ....	72
Tabla 13. Resultados modulo reológico de corte dinámico (original). ....	73
Tabla 14. Resultados ensaye MSCR Asf-2 mas aditivos (original). ....	75
Tabla 15. Resultados cambio de masa Asf-2 mas aditivos. ....	77
Tabla 16. Resultados modulo reológico de corte dinámico (RTFO). ....	79
Tabla 17. Resultados MSCR con aditivo (RTFO). ....	81
Tabla 18. Resultados de $G^*/\text{sen } \delta$ de mezclas de Asf-1, Asf-2 y aditivos. ....	83
Tabla 19. Resultados de ensaye MSCR de mezclas de Asf-1, Asf-2 y aditivos. ....	85
Tabla 20. Requisitos de calidad asfalto PG, <i>N-CMT-4-05-004/2025</i> ....	46
Tabla 21. Resultados asfalto base Asf-2. ....	52

Tabla 22. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo. ....	99
Tabla 23. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo. ....	100
Tabla 24. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo. ....	100
Tabla 25. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo. ....	101
Tabla 26. Composición química de los aditivos rejuvenecedores. ....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno rotario de película delgada. ....	24
Figura 2. Reómetro de corte dinámico (DSR). ....	25
Figura 3. (a) Olla de envejecimiento a presión PAV, (b) horno de secado al vacío. .....	26
Figura 4. Reómetro de corte dinámico (DSR). ....	27
Figura 5. Reómetro de viga a flexión (BBR). ....	28
Figura 6. Reómetro de corte dinámico (DSR). ....	29
Figura 7. Métodos disponibles para extracción del asfalto .....	33
Figura 8. Equipo de centrifugado y extractor por reflujo .....	37
Figura 9. Métodos disponibles para la recuperación del asfalto .....	38
Figura 10. Evaporador rotatorio .....	39
Figura 11. Equipo para recuperación del ligante- método de abson .....	40
Figura 12. Esquema metodológico general. ....	45
Figura 13. Muestreo del rap en pila de almacenamiento. ....	53
Figura 14. Secado de muestra en horno. ....	54
Figura 15. Extracción del ligante en el rotarex. ....	55
Figura 16. (a) Presencia de material fino en el residuo, (b) filtrado del residuo por tamiz de 0.150 mm, (c) filtrado del residuo por tamiz de 0.075 mm, (d) filtrado al vacío. ....	56
Figura 17. (a) Proceso de filtrado, (b) filtrado del residuo por tamiz de 0.150 mm, (c) filtrado del residuo por tamiz de 0.075 mm. ....	58
Figura 18. Presencia de material fino en tamiz. ....	59
Figura 19. Extracción mediante rotavapor. ....	60

Figura 20. Elaboración de la muestra para reología. ....	62
Figura 21. Determinación de TC en DSR a altas temperaturas (original). ....	69
Figura 22. Determinación de TC en BBR a bajas temperaturas (s). ....	70
Figura 23. Determinación de TC en BBR a bajas temperaturas (m). ....	71
Figura 24. Comparación del $G^*/\text{sen}\delta$ con los 4 aditivos (original). ....	74
Figura 25. MSCR con aditivos (original). ....	76
Figura 26. Cambio de masa asf-2 más porcentaje optimo aditivos. ....	78
Figura 27. Comparación del $G^*/\text{sen}\delta$ con los 4 aditivos (RTFO). ....	80
Figura 28. MSCR con aditivos (RTFO). ....	82
Figura 29. Comparación de las mezclas de $G^*/\text{sen}\delta$ . ....	85
Figura 30. Comparación del mscr (mezclas). ....	86
Figura 31. Ligante asfáltico base PG 70-16 (Asf-2). ....	47
Figura 32. Pesaje de la muestra. ....	47
Figura 33. Ejecución del ensaye. ....	48
Figura 34. (a) Recuperación de muestra para ensaye en BBR, (b) vasija de envejecimiento a presión (PAV). ....	49
Figura 35. Elaboración de muestra de 8 mm. ....	50
Figura 36. Elaboración de vigas. ....	51
Figura 37. Ejecución prueba MSCR. ....	52
Figura 38. Adición de aditivo KA-918R (Ad-1). ....	99
Figura 39. Adición de aditivo iterlene ACF 2000 Green (Ad-2). ....	100
Figura 40. Adición de aditivo evoflex CA-9 (Ad-3). ....	101
Figura 41. Adición de aditivo Danox RAP 305 (Ad-4). ....	102

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los pavimentos asfálticos se degradan con el paso del tiempo debido a la acción del tránsito, la temperatura, la humedad y otros factores ambientales. Cuando estos pavimentos llegan al final de su vida útil son retirados mediante procesos de fresado o demolición. De este procedimiento se obtiene el pavimento asfáltico recuperado, conocido como RAP, el cual está compuesto por agregados pétreos y ligante asfáltico envejecido, y puede reutilizarse en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas. Sin embargo, uno de los principales problemas al emplear RAP es que el ligante asfáltico contenido ha sido sometido a procesos de envejecimiento durante su vida de servicio, lo que modifica sus propiedades originales y afecta su comportamiento dentro de una nueva mezcla.

De acuerdo con Grilli *et al.* (2017) y Tauste *et al.* (2018), el envejecimiento del ligante asfáltico se debe principalmente a la pérdida de componentes volátiles y a la oxidación, como consecuencia, presenta una mayor rigidez una menor flexibilidad y una reducción en su capacidad de deformación, lo que puede incrementar la susceptibilidad al agrietamiento y disminuir la durabilidad de la mezcla.

Asimismo, Zaumanis *et al.* (2016) señalan que, aunque los materiales del RAP pudieron haber cumplido con las especificaciones al momento de su construcción, el envejecimiento del ligante provoca una pérdida importante de maltenos. Esta pérdida genera un aumento en la rigidez del ligante y una disminución de su elasticidad, lo que puede transferir características no deseadas a la nueva mezcla asfáltica, especialmente cuando se emplean altos porcentajes de RAP.

Cuando se incorporan contenidos bajos de RAP, entre 10 % y 20 %, el efecto del ligante envejecido sobre las propiedades globales de la mezcla puede ser limitado. Sin embargo, al utilizar porcentajes superiores al 30 %, la influencia del ligante envejecido se vuelve más significativa, por lo que resulta necesario extraerlo, recuperarlo y evaluar sus propiedades físicas y mecánicas. En estos casos, el uso de aditivos rejuvenecedores se convierte en una alternativa para revertir parcialmente las propiedades perdidas del ligante asfáltico durante su vida de servicio.

Por lo anterior expuesto, la problemática principal de esta investigación se centra en

la recuperación de las propiedades perdidas del ligante asfáltico envejecido presente en el RAP mediante el uso de aditivos rejuvenecedores.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El uso de RAP en el diseño de mezclas asfálticas constituye una alternativa de gran interés técnico ya que permite reutilizar materiales provenientes de pavimentos que han concluido su vida útil, reduciendo el consumo de recursos vírgenes y los costos asociados a la construcción y rehabilitación de carreteras. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes en la incorporación de RAP radica en el estado del ligante asfáltico envejecido contenido en este material, debido a que durante su vida en servicio ha experimentado procesos de oxidación y endurecimiento que modifican de manera significativa sus propiedades originales.

Como consecuencia de este envejecimiento, el ligante del RAP presenta una mayor rigidez, menor capacidad de adhesión y una reducida flexibilidad, condiciones que pueden afectar negativamente el desempeño de las mezclas asfálticas recicladas. En particular, estas características incrementan la susceptibilidad a la fisuración por fatiga y por cambios térmicos, además de comprometer la cohesión entre el ligante envejecido y el ligante nuevo, lo que puede traducirse en una menor durabilidad del pavimento.

Ante esta problemática, el uso de aditivos rejuvenecedores ha sido identificado como una estrategia eficaz para restaurar, parcial o totalmente, las propiedades del ligante envejecido. De acuerdo con Zaumanis *et al.* (2013), los rejuvenecedores representan uno de los enfoques más utilizados para recuperar las propiedades del ligante asfáltico del RAP. Por su parte, Tran *et al.* (2012) señalan que estos aditivos contienen generalmente una alta proporción de maltenos, los cuales ayudan a reequilibrar la composición del ligante envejecido y a compensar la pérdida de componentes ligeros ocasionada por la oxidación. Asimismo, Yu *et al.* (2014) y Zaumanis *et al.* (2013) reportan que los rejuvenecedores pueden revertir parcialmente las propiedades físicas, químicas degradadas del asfalto envejecido, favoreciendo su reincorporación en un nuevo ciclo de servicio.

No obstante, la efectividad de los rejuvenecedores depende de diversos factores,

entre ellos el tipo de aditivo, su dosificación, la compatibilidad con el ligante base y el grado de interacción con el ligante envejecido, tal como lo indican Yin *et al.* (2017). Por ello, resulta indispensable evaluar experimentalmente el comportamiento del ligante recuperado del RAP al incorporar distintos rejuvenecedores, con el propósito de identificar cuál de ellos presenta un mejor desempeño en la restauración de sus propiedades.

Además, la necesidad de este tipo de estudios se vuelve aún más relevante cuando se pretende utilizar contenidos altos de RAP en mezclas asfálticas. En este sentido, el Reporte 452 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) recomienda que, cuando se empleen porcentajes superiores al 30 % de RAP, se realice la extracción y recuperación del ligante asfáltico para analizar sus propiedades físicas y mecánicas y determinar la necesidad de incorporar rejuvenecedores que permitan restablecer las propiedades perdidas durante su vida de servicio.

En virtud de lo anterior, la presente investigación se justifica en la necesidad de estudiar el efecto de tres rejuvenecedores sobre el ligante asfáltico extraído del RAP, con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, y comprobar su capacidad para restaurar las características que perdió durante su envejecimiento. Los resultados permitirán generar conocimiento técnico sobre la viabilidad del uso de RAP en mezclas asfálticas, particularmente en contenidos del 30 %, contribuyendo tanto al mejor aprovechamiento de materiales reciclados como al desarrollo de soluciones más sostenibles y eficientes para la infraestructura vial.

### **3. HIPÓTESIS**

La incorporación de aditivos rejuvenecedores KA-918R, Iterlene ACF-2000 Green y Evoflex CA-9 al ligante asfáltico extraído del RAP reducirá los efectos del envejecimiento, modificando sus propiedades físicas, como el cambio de masa, y sus propiedades mecánicas, como el módulo complejo, ángulo de fase, rigidez a la fluencia ( $S$ ), pendiente de relajación ( $m$ ), recuperación elástica.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1 General**

Modificar el ligante asfáltico extraído del RAP mediante la incorporación de aditivos rejuvenecedores KA-918R, Iterlene ACF-2000 Green y Evoflex CA-9, con el objetivo de recuperar sus propiedades físicas y mecánicas, sin comprometer el desempeño de la mezcla final.

#### **4.2 Específicos**

- Determinar la dosis óptima de los aditivos rejuvenecedores que permita recuperar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico extraído del RAP.
- Identificar, a través del análisis de resultados gráficos, el aditivo rejuvenecedor que ofrece el mejor desempeño para su incorporación en mezclas asfálticas con RAP.

### **5. MARCO TEÓRICO**

#### **5.1 Antecedentes**

El RAP se define como el material obtenido a partir de la disgregación de capas de pavimento asfáltico, mediante procesos de fresado, demolición o trituración, una vez que estas han alcanzado el final de su vida útil. Por su parte, el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, por sus siglas en inglés) lo describe como el pavimento asfáltico envejecido que se remueve mediante fresado o extracción, y que conserva valor tanto en sus agregados como en su ligante, lo que permite su reutilización en nuevas mezclas asfálticas. Lejos de ser considerado un residuo, el RAP representa una fuente de materia prima valiosa, compuesta principalmente por agregados pétreos de alta calidad y un ligante asfáltico envejecido que, al ser reprocesado, puede reincorporarse en nuevas mezclas asfálticas, tanto en caliente como en frío, contribuyendo activamente a la economía circular en la construcción vial (Copeland, 2011).

### **5.1.1 Generalidades del RAP**

La composición del RAP es inherentemente heterogénea; sin embargo, típicamente contiene alrededor de 95 % de agregados minerales y 5 % de ligante asfáltico. Debido al envejecimiento oxidativo sufrido durante el servicio, el ligante presenta mayor viscosidad, rigidez y menor ductilidad que el asfalto virgen. Esta condición exige técnicas específicas de diseño de mezclas, que con frecuencia incluyen el uso de agentes rejuvenecedores o ligantes más blandos para restituir las propiedades reológicas originales del material. Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación controlada de RAP, en proporciones bajas, medias o incluso altas, puede producir mezclas con un desempeño mecánico comparable o superior al de mezclas convencionales, especialmente en términos de resistencia al ahuellamiento (Copeland, 2011).

Desde una perspectiva ambiental y económica, la reutilización del RAP se consolida como una estrategia sostenible clave en la rehabilitación de pavimentos. Su aplicación reduce la necesidad de extraer agregados vírgenes y disminuye la demanda de cemento asfáltico nuevo, generando ahorros significativos en los costos de producción estimados entre 15 % y 40 % y reduciendo simultáneamente la huella de carbono al minimizar el consumo energético y las emisiones asociadas a la fabricación de materiales nuevos, además de evitar la disposición en vertederos (Huang, Bird, & Heidrich, 2007).

En cuanto a sus aplicaciones, el RAP puede emplearse en la estabilización de bases granulares, capas recicladas en frío o en caliente, y en la producción de nuevas capas asfálticas estructurales, permitiendo en muchos casos la reapertura rápida al tránsito. No obstante, el éxito de su implementación depende de un riguroso control de calidad, que incluye la caracterización granulométrica del material recuperado, la determinación del contenido de ligante y el análisis de las propiedades del asfalto envejecido para asegurar la homogeneidad y el desempeño de la mezcla final.

El Reporte N.º 452 enfatiza que, al incorporar RAP, es fundamental considerar el material existente dentro del diseño volumétrico y mecánico de la mezcla. El agregado proveniente del RAP debe integrarse con el agregado virgen cumpliendo requisitos físicos y de gradación, mientras que el ligante envejecido debe evaluarse debido a su

influencia directa en la rigidez total del sistema (McDaniel & Anderson, 2001). Durante la vida útil del pavimento, el ligante asfáltico se endurece por oxidación. Si este asfalto envejecido se incorpora en grandes proporciones, puede incrementar excesivamente la rigidez de la mezcla resultante. Para contrarrestar este efecto, se recomienda utilizar un ligante virgen de menor grado de desempeño (más blando) o emplear rejuvenecedores. Cuando el contenido de RAP es bajo (10–20 %), la influencia del ligante envejecido suele ser limitada y no requiere ajustes significativos; sin embargo, a medida que aumenta la proporción de RAP, se hace necesario modificar el grado del ligante o recuperar y caracterizar el ligante existente para diseñar adecuadamente la mezcla.

**Tabla 1. Selección del cemento asfáltico para mezclas con RAP.**

Grado del cemento asfáltico nuevo recomendado	Porcentaje de RAP		
	Grado PG del RAP recuperado		
	PG xx-22 o menor	PG xx-16	PG xx-10 o mayor
No cambiar la selección del PG nuevo del proyecto	<20 %	<15 %	<10 %
PG nuevo deberá ser un grado menor que el de la mezcla ( ejemplo: seleccionar PG 58-28 si el requerido por la nueva mezcla es un PG 64-22)	20-30 %	15-25 %	10-15 %
Seguir las recomendaciones de la carta de mezclado	>30 %	>25 %	>15 %

Fuente: (McDaniel y Anderson, 2001)

### 5.1.2 Técnicas de reciclado del pavimento flexible

El reciclado del pavimento asfáltico constituye una alternativa eficiente para la rehabilitación de pavimentos flexibles, ya que permite reutilizar los materiales provenientes de capas asfálticas que han cumplido su vida útil en servicio. Estas técnicas de reciclado pueden ejecutarse mediante distintos procedimientos constructivos, los cuales presentan características particulares, así como ventajas y limitaciones específicas en función del tipo de deterioro, las condiciones del proyecto y los recursos disponibles. A continuación, se describen las principales técnicas de reciclado aplicables a pavimentos flexibles, destacando sus beneficios y restricciones más relevantes, con base en lo reportado por Monroy *et al.* (2020).

#### **5.1.2.1 Reciclado superficial**

El reciclado superficial consiste en la reutilización del material de las capas más externas del pavimento, sin necesidad de remover completamente la estructura existente. Esta técnica se emplea principalmente en capas con deterioro superficial, generalmente con espesores del orden de 2 a 5 cm. El material recuperado se combina con ligantes rejuvenecedores o aditivos, y posteriormente se recompone y compacta para conformar una nueva superficie de rodadura.

Entre las principales ventajas de esta técnica se encuentra la mejora en la resistencia al deslizamiento, la corrección de defectos de origen superficial y la regularización del perfil geométrico de la calzada. Asimismo, permite habilitar el tránsito en periodos cortos y evitar la colocación de capas adicionales que afecten el gálibo del pavimento. No obstante, su correcta aplicación requiere un mezclado adecuado del material y un estricto control del proceso constructivo, ya que una deficiente ejecución puede generar agrietamientos prematuros y afectar el desempeño de la capa reciclada.

#### **5.1.2.2 Reciclado in situ**

El reciclado in situ se basa en el aprovechamiento de la carpeta asfáltica existente como material base para su rehabilitación. En este proceso, el pavimento deteriorado se fresa o pulveriza, se mezcla con agentes estabilizantes, agua o ligantes, y se reutiliza directamente en el sitio de la obra, eliminando la necesidad de transporte hacia una planta externa.

Esta técnica permite mejorar tanto las condiciones superficiales como, de manera

limitada, la capacidad estructural del pavimento. Además, contribuye a la reducción temporal de fisuras reflejas, corrige deformaciones plásticas en capas superficiales y mejora el perfil longitudinal y transversal de la calzada. Sin embargo, el reciclado in situ presenta ciertas desventajas, entre las que destacan la imposibilidad de acopiar el material, la necesidad de un control cuidadoso del contenido de agua y la compactación, así como la limitada adopción de esta técnica debido a la falta de difusión técnica, normatividad y experiencia en algunos sectores del gremio constructor.

### **5.1.2.3 Reciclado en planta**

El reciclado en planta implica el traslado del pavimento asfáltico recuperado (RAP) a una planta de producción de mezclas asfálticas, donde es procesado, clasificado y combinado con ligantes vírgenes o aditivos rejuvenecedores para la fabricación de nuevas mezclas asfálticas. Este procedimiento permite un mayor control de calidad durante la dosificación y producción del material reciclado.

Entre sus principales ventajas se encuentra la posibilidad de mejorar el comportamiento estructural del pavimento de acuerdo con las exigencias del proyecto, corregir deficiencias tanto superficiales como estructurales y producir mezclas asfálticas con propiedades más homogéneas y controladas. Asimismo, esta técnica permite eliminar capas intermedias con desempeño deficiente y mejorar la resistencia al deslizamiento y el perfil geométrico de la calzada. Como limitaciones, se identifican la necesidad de transportar el material RAP, el requerimiento de equipos especializados en planta, el control estricto de la humedad y el almacenamiento adecuado del material, así como la realización de un mayor número de ensayos para garantizar la calidad del producto final.

### **5.1.3 Mezclas asfálticas en caliente con RAP**

La incorporación de RAP en mezclas asfálticas en caliente permite reutilizar simultáneamente agregados y ligante envejecido, pero también introduce complejidad al proceso de diseño. A medida que aumenta el porcentaje de RAP, la mezcla tiende a mostrar mayor rigidez global debido al aporte del ligante oxidado adherido al material reciclado. Por ello, el comportamiento de la mezcla depende no solo del contenido de

RAP, sino también de la calidad del material recuperado, del grado de envejecimiento del ligante, del método de dosificación y del nivel real de interacción entre el ligante virgen y el recuperado.

La literatura reciente indica que las mezclas con RAP pueden presentar un desempeño satisfactorio cuando se diseña correctamente el sistema ligante; sin embargo, los contenidos altos de RAP suelen asociarse con mayor riesgo de fisuración si no se compensa la pérdida de flexibilidad del material envejecido. Jiang *et al.* (2023) reportaron que el aumento del RAP mejoró la resistencia al ahuellamiento, pero redujo la resistencia a humedad y a fisuración a baja temperatura, además de identificar un comportamiento favorable cerca de 30 % de RAP dentro de sus condiciones experimentales. Este hallazgo es relevante para investigaciones como la presente, en las que se busca validar técnicamente un contenido de RAP del 30 % mediante el uso de rejuvenecedores.

#### **5.1.4 Ligante asfáltico y proceso de envejecimiento**

El ligante asfáltico es un material viscoelástico cuya función principal dentro de la mezcla es unir los agregados y proporcionar cohesión, flexibilidad e impermeabilidad al sistema. Sin embargo, durante la producción, colocación y vida en servicio del pavimento, este ligante experimenta procesos de envejecimiento que modifican su composición química y su respuesta mecánica. Dichos procesos ocurren por efecto de la oxidación, la pérdida de componentes volátiles y la exposición a temperatura, radiación y ambiente, lo que produce un aumento de rigidez y una disminución de la capacidad de deformación del material.

En el caso del RAP, el ligante ya ha estado expuesto a años de servicio, por lo que suele encontrarse endurecido y más frágil que un ligante virgen. Esta condición favorece, en ciertos casos, una mayor resistencia al ahuellamiento, pero también incrementa la susceptibilidad a la fatiga y al agrietamiento térmico, especialmente cuando el contenido de RAP es elevado y no se corrigen adecuadamente las propiedades del ligante envejecido. Las revisiones recientes muestran que el envejecimiento del asfalto se asocia con cambios en el equilibrio entre fracciones más ligeras y más pesadas, lo que altera parámetros físicos y reológicos clave para el desempeño del pavimento.

### **5.1.5 Asfalto PG**

Según la Norma N·CMT·4·05·004/25, el grado de desempeño (PG, por sus siglas en inglés) se refiere al rango de temperaturas, desde la máxima hasta la mínima, dentro del cual un cemento asfáltico, ya sea convencional o modificado, mantiene un desempeño adecuado. Este parámetro es crucial para seleccionar el tipo de cemento asfáltico más adecuado para cada obra, considerando factores como el clima predominante de la región, la intensidad del tránsito esperado y la velocidad de operación a la que estará sujeta la carretera durante su vida útil. El PG ayuda a asegurar que el asfalto seleccionado pueda soportar las condiciones climáticas y operativas de la zona sin comprometer la durabilidad y el rendimiento del pavimento a lo largo del tiempo.

#### **5.1.5.1 Selección del Cemento Asfáltico Según su Grado de Desempeño (PG)**

La selección del cemento asfáltico de acuerdo con su grado de desempeño debe considerar las temperaturas máximas y mínimas de la zona en la que se ejecutará la obra. Además, es necesario ajustar estas temperaturas en función de la intensidad del tránsito y la velocidad de operación de la carretera, como se explica a continuación:

#### **5.1.5.2 Temperaturas Máxima y Mínima**

La determinación de las temperaturas máxima y mínima en la zona donde se construirá la obra se realizará utilizando los datos estadísticos de las temperaturas registradas a lo largo de los últimos 20 años. A partir de estos datos, se calcularán las temperaturas máxima ( $T_{máx}$ ) y mínima ( $T_{mín}$ ) del pavimento en los sitios de inicio ( $T_{máx1}$ ) y final ( $T_{máx2}$ ) del tramo en cuestión, según la siguiente fórmula:

$$T_{máxi} = 54,32 + 0,78T_{airM} - 0,0025Lati^2 - 15,14\log(H + 25) + Z(9 + 0,61\sigma T_{airM}^2)^{0.5}$$

Donde:

$T_{máxi}$  = Temperatura máxima calculada debajo de la superficie del pavimento en el

sitio  $i=1$  donde inicia el tramo o  $i=2$  donde termina el tramo por construir, ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{airM}$  = 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, ( $^{\circ}\text{C}$ )

Lati = Latitud, en el sitio  $i=1$  donde inicia el tramo o  $i=2$  donde termina el tramo por construir, ( $^{\circ}$ , 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 %).

$\sigma_{2T_{airM}}$  = Desviación estándar de la temperatura de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos 20 años en la zona, ( $^{\circ}\text{C}$ )

Las temperaturas máxima y mínima obtenidas determinarán el rango en el cual el cemento asfáltico deberá operar satisfactoriamente. Si la temperatura máxima calculada supera los  $82^{\circ}\text{C}$ , se requerirá un diseño especial. En estos casos, se justifica técnica y adecuadamente el uso de un asfalto con un PG específico, por ejemplo, PG 64-16.

**Tabla 2. 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  Intensidad del tránsito ( $\Sigma L$ ) <sup>[1]</sup>	Nivel de ajuste		
	$v > 70$	$20 \leq v \leq 70$	$v < 20$
$\Sigma L < 10^6$	Normal (S)	Alto (H)	Muy alto (V)
$10^6 \leq \Sigma L \leq 30 \times 10^6$	Alto (H)	Alto (H)	Muy alto (V)
$\Sigma L > 30 \times 10^6$	Muy alto (V)	Muy alto (V)	Extremadamente alto (E)

[1]  $\Sigma L$  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; obtenido con el método de Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial.

Fuente: N·CMT·4·05·004/18

## 5.1.6 Ensayos de calidad para asfaltos PG

### 5.1.6.1 Envejecimiento del cemento asfáltico en Horno Rotario de Película Delgada (RTFO)

De acuerdo con la norma **ASTM D2872 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**, esta prueba permite, mediante el efecto del calor y aire aplicados a una película de cemento asfáltico semisólido, obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo que ocurren durante el transporte, mezclado en caliente, tendido y compactación de la mezcla asfáltica. A fin de determinar, a partir de la medición de la viscosidad y sus características reológicas, el efecto de este envejecimiento. Esta prueba se utiliza también para determinar el cambio de masa por la pérdida de componentes volátiles durante el proceso de envejecimiento a corto plazo.

Se realiza el envejecimiento del ligante en el Horno Rotario De Película Delgada (RTFO, por sus siglas en inglés) para simular el envejecimiento severo por oxidación y evaporación de aglutinantes asfálticos convencionales y modificados a corto plazo. Para realizar la prueba, se utilizan 8 vasos de asfalto de  $35 \pm 0.5$  gramos, los cuales se colocan en el horno RTFO a una temperatura de  $163 \pm 0.5$  °C por un tiempo de 85 minutos a una velocidad de  $4000 \pm 200$  mL/min.



**Figura 1. Horno Rotario de Película Delgada.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.6.2 Módulo reológico de corte dinámico (original y RTFO). ASTM D 7175

Este método de prueba cubre la determinación del módulo de corte complejo y el ángulo de fase de los ligantes asfálticos cuando se prueban en corte dinámico (oscilatorio) utilizando geometría de placas paralelas, bajo la normativa **ASTM D7175 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**, la prueba consiste en aplicar un esfuerzo sinusoidal a una muestra de asfalto de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor, mediante dos platos paralelos. El DSR aplica un esfuerzo necesario para lograr que el material presente un 12 % de deformación a una frecuencia de 10 rad/s. El parámetro de cumplimiento es  $G^*/\sin \delta$  mayor o igual 1 kPa para la condición original y 2.2 kPa mayor o igual para la condición después de RTFO.



Figura 2. Reómetro de corte dinámico (DSR).

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.6.3 Envejecimiento en PAV según la norma ASTM D6521

Esta prueba tiene como objetivo simular el envejecimiento oxidativo en servicio que ocurre en los ligantes asfálticos durante el servicio del pavimento. Los residuos de esta práctica de acondicionamiento se pueden utilizar para estimar las propiedades físicas o químicas de los ligantes asfálticos después de varios años de envejecimiento en servicio en el campo. El residuo obtenido en la prueba ASTM D2872 (envejecimiento del ligante en el horno rotario de película delgada) se somete a envejecimiento a largo plazo,

mediante la vasija de envejecimiento a presión (PAV, por sus siglas en inglés) bajo la normativa **ASTM D6521 Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**, para posteriormente analizarlo en el DSR para obtener los valores de módulo de corte ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , para evaluar la resistencia a la fatiga del asfalto, se aplica un esfuerzo sinusoidal al residuo obtenido en PAV, de 8 mm de diámetro y 1 mm de espesor, mediante dos platos paralelos. El DSR aplica un esfuerzo necesario para lograr que el material presente 1 % de deformación a una frecuencia de 10 rad/s. El valor de cumplimiento debe ser de  $G^*/\text{sen } \delta$  menor o igual 5000 kPa.



Figura 3. (A) Olla de envejecimiento a presión PAV, (B) Horno de secado al vacío.

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.6.4 Módulo reológico de corte dinámico (PAV). ASTM D7175

Este método de prueba cubre la determinación del módulo de corte complejo y el ángulo de fase de los ligantes asfálticos cuando se prueban en corte dinámico (oscilatorio) utilizando geometría de placas paralelas, bajo la normativa **ASTM D7175 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. El residuo obtenido en la prueba ASTM D2872

(envejecimiento del ligante en el horno rotario de película delgada) se somete a envejecimiento a largo plazo, mediante la vasija de envejecimiento a presión bajo la normativa ASTM D6521 para posteriormente analizarlo en el DSR para obtener los valores de módulo de corte ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , para evaluar la resistencia a la fatiga del asfalto, se aplica un esfuerzo sinusoidal al residuo obtenido en PAV, de 8 mm de diámetro y 1 mm de espesor, mediante dos platos paralelos. El DSR aplica un esfuerzo necesario para lograr que el material presente 1 % de deformación a una frecuencia de 10 rad/s. El valor de cumplimiento debe ser de  $G^*/\text{sen } \delta$  menor o igual 5000 kPa.

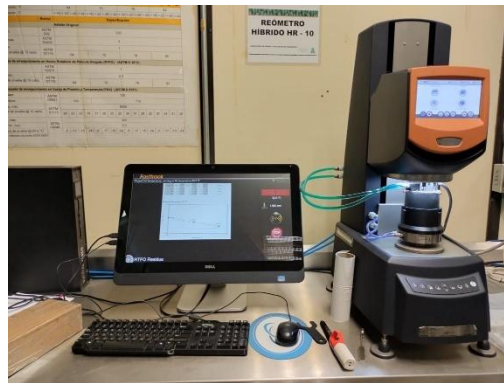


Figura 4. Reómetro de corte dinámico (DSR).

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.6.5 Rigidez a flexión en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR). ASTM D6648

Este método se trabaja bajo la normativa ***Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*** cubre la determinación de la rigidez o flexibilidad por fluencia y el valor  $m$  de los ligantes asfálticos por medio de un reómetro de viga de flexión. Es aplicable a materiales que tienen valores de rigidez por fluencia por fluencia en el rango de 20 MPa a 1 GPa (valores de flexibilidad por fluencia en el rango de  $50 \text{ nPa}^{-1}$  a  $1 \text{ nPa}^{-1}$ ) y se puede utilizar con material no envejecido o con materiales envejecidos utilizando procedimientos de envejecimiento como el método de ensayo **D2872** o la práctica **D652**. El aparato de ensayo puede funcionar dentro del rango de temperatura de  $-36 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para evaluar la resistencia del ligante asfáltico a las fisuras inducidas

por contracción térmica cuando se expone a temperaturas bajas, determinando sus propiedades reológicas y su capacidad de relajación de tensiones. Con el residuo obtenido en la prueba **ASTM D6521**, la prueba consiste en elaborar vigas de  $127 \pm 5$  mm de largo,  $12.7 \pm 0.05$  de largo y con un grosor de  $6.35 \pm 0.05$  mm, la muestra se coloca en un baño de agua a temperatura controlada, se le aplica una carga de  $980 \pm 50$  mN durante un tiempo de 240 segundos. La temperatura crítica es aquella a la cual el ligante cumple simultáneamente con los límites de  $S \leq 300$  MPa (Módulo de flexión (Stiffness, S)) y  $m\text{-value} \geq 0.3$  (Relación de relajación (m-value)).



**Figura 5. Reómetro de Viga a Flexión (BBR).**

Fuente: Elaboración propia

#### **5.1.6.6 Esfuerzo-deformación-recuperación múltiple (MSCR) ASTM D7405**

Este método de prueba cubre la determinación del porcentaje de recuperación y la flexibilidad no recuperable de los ligantes asfálticos mediante la prueba de fluencia y recuperación por múltiples tensiones (MSCR) bajo la normativa **ASTM D7405 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. La prueba MSCR se realiza utilizando el reómetro de corte dinámico a una temperatura específica. Se elabora una muestra de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor para posteriormente aplicarle un esfuerzo de 0.1 kPa durante 20 ciclos y 3.2 kPa durante 10 ciclos, cada ciclo consta de 1 segundo de aplicación de carga y 9 segundos de recuperación sin carga, lo que equivale a una duración de 10 segundos por ciclo.



**Figura 6. Reómetro de corte dinámico (DSR).**

Fuente: Elaboración propia

### **5.1.7 Aditivos Rejuvenecedores**

Según Al-Qadi *et al.* (2007), Heneash (2013) y Zaumanis *et al.* (2014b), los aditivos rejuvenecedores son compuestos orgánicos diseñados para recuperar las propiedades físicas, químicas y reológicas de los asfaltos deteriorados. Estos aditivos revierten el proceso de envejecimiento del asfalto, permitiendo extender su vida útil y mejorando su desempeño. Aunque los agentes ablandadores también reducen la viscosidad de los asfaltos envejecidos, su acción se limita a suavizar el material sin restaurar las propiedades fundamentales del ligante envejecido, como lo hacen los rejuvenecedores. Yu *et al.* (2014) y Zaumanis *et al.* (2015) mencionan varias ventajas de usar rejuvenecedores en mezclas asfálticas, tales como:

- Ampliación del rango de aplicación del RAP, permitiendo el uso de hasta un 100 % de este material reciclado.
- Almacenamiento eficiente y económico, ya que no requieren calentarse para su aplicación.
- Facilidad de integración a la mezcla, mediante el uso de bombas o sistemas de dosificación en estado líquido.
- Alta precisión en la dosificación, adaptándose a las propiedades específicas del asfalto recuperado.
- Reducción de los costos de producción de mezclas asfálticas recicladas, lo que favorece la economía en la construcción de pavimentos.

En cuanto a la compensación del envejecimiento de un asfalto mediante rejuvenecedores, Al-Qadi *et al.* (2007) y Zaumanis *et al.* (2014b) subrayan la importancia de considerar dos aspectos clave: la elección del tipo de agente rejuvenecedor y la dosificación adecuada. Los rejuvenecedores deben ser compatibles con el asfalto envejecido. Generalmente, los rejuvenecedores más eficaces son aquellos con bajo contenido de saturados y alta proporción de aromáticos. Sin embargo, la incompatibilidad o el exceso de dosificación pueden generar daños inducidos por la humedad y pérdida de adherencia entre los agregados y el ligante, afectando la durabilidad del pavimento.

#### **5.1.7.1 Mecanismo de acción de los rejuvenecedores**

Los aditivos rejuvenecedores actúan principalmente modificando el equilibrio interno del ligante envejecido. Según Bhatt *et al.* (2025), estos aditivos restauran parcialmente las propiedades perdidas del asfalto envejecido, disminuyendo la rigidez y mejorando la capacidad de deformación. La literatura sugiere que los rejuvenecedores aumentan la fracción malténica, mejoran la dispersión de asfaltenos y reducen la rigidez general del sistema. Sin embargo, restaurar las propiedades originales del asfalto no garantiza un buen desempeño a largo plazo, ya que los rejuvenecedores deben mantener su efectividad a lo largo del tiempo y ser compatibles con el proceso de envejecimiento posterior.

La durabilidad de un sistema rejuvenecido es uno de los temas más debatidos en la investigación actual, ya que la efectividad de los rejuvenecedores debe evaluarse en función de la evolución de las propiedades del asfalto durante el servicio en el pavimento.

#### **5.1.7.2 Clasificación de los Rejuvenecedores**

Los rejuvenecedores pueden clasificarse en tres tipos principales: productos de base petrolera, productos de base biológica y formulaciones compuestas o híbridas. Los rejuvenecedores de base petrolera son ampliamente utilizados por su compatibilidad con el sistema asfáltico, mientras que los de base biológica han ganado atención recientemente debido a su potencial de sostenibilidad. Estos productos biológicos

proviene de aceites vegetales, residuos orgánicos y otros subproductos renovables. Según Cavalli *et al.* (2024), los bio-rejuvenecedores ofrecen ventajas ambientales, pero todavía presentan desafíos relacionados con su variabilidad, estabilidad térmica y comportamiento a largo plazo.

### **5.1.7.3 Selección del Rejuvenecedor**

La selección de rejuvenecedores puede realizarse mediante diferentes métodos de evaluación, los cuales buscan determinar el tipo y la dosificación más adecuada del aditivo para restaurar las propiedades del ligante envejecido sin afectar negativamente el desempeño de la mezcla asfáltica reciclada. Entre los métodos más utilizados se encuentran los criterios basados en el grado de desempeño del ligante, los parámetros reológicos, los indicadores de agrietamiento y los ensayos de desempeño de la mezcla. Uno de los métodos más empleados es la selección mediante el grado de desempeño PG. En este procedimiento se recupera el ligante envejecido proveniente del RAP y se mezcla con diferentes porcentajes de rejuvenecedor, con el fin de verificar si el ligante rejuvenecido alcanza el grado PG requerido para las condiciones climáticas y de tránsito del proyecto. De acuerdo con Arámbula-Mercado *et al.* (2018), este enfoque permite comparar distintas dosificaciones de agentes reciclantes y evaluar su efecto sobre el comportamiento del ligante y de la mezcla.

Otro método corresponde al uso del parámetro  $\Delta T_c$ , el cual se emplea como indicador de la susceptibilidad del ligante al agrietamiento, especialmente a bajas temperaturas y después del envejecimiento. Mediante este criterio, la dosis del rejuvenecedor se selecciona buscando que el ligante envejecido recupere un comportamiento menos rígido y menos frágil. En este sentido, Arámbula-Mercado *et al.* (2018) y Haghshenas *et al.* (2024) señalan que los parámetros asociados al agrietamiento y al envejecimiento permiten complementar la selección basada únicamente en el ablandamiento del ligante.

También se utilizan métodos reológicos avanzados, en los cuales se analizan propiedades como la rigidez, el ángulo de fase, el módulo complejo, el comportamiento viscoelástico y otros parámetros de falla del ligante. Estos métodos permiten comparar el comportamiento del ligante rejuvenecido con el de un ligante virgen de referencia. Sin embargo, Behnood (2019) indica que la selección del rejuvenecedor no debe limitarse

a restaurar la consistencia del ligante, sino que debe considerar su efecto sobre las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad. Asimismo, Haghshenas *et al.* (2024) señalan que la selección de la dosis únicamente con base en el PG puede no ser suficiente para reproducir completamente las características reológicas y de falla del ligante objetivo.

Además, la selección del rejuvenecedor puede realizarse mediante ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica, ya que un aditivo puede mejorar las propiedades del ligante, pero no necesariamente garantizar un buen comportamiento de la mezcla. Por esta razón, se recomienda evaluar propiedades como resistencia al ahuellamiento, resistencia al agrietamiento, daño por humedad, estabilidad, módulo dinámico y resistencia a la fatiga. Tran *et al.* (2012) señalan que la incorporación adecuada de rejuvenecedores puede mejorar el desempeño de mezclas con altos contenidos de RAP y RAS, siempre que se verifique su comportamiento mecánico. Finalmente, algunos estudios recomiendan aplicar un enfoque de diseño balanceado de mezclas, en el cual la selección del rejuvenecedor se realiza buscando un equilibrio entre la mejora de la flexibilidad y la conservación de la estabilidad estructural. Esto es importante porque una dosis insuficiente puede no restaurar adecuadamente el ligante envejecido, mientras que una dosis excesiva puede generar una mezcla demasiado blanda, susceptible al ahuellamiento y a la pérdida de estabilidad. En este sentido, Behnood (2019) y la National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020) coinciden en que la selección adecuada del rejuvenecedor debe considerar de manera conjunta el comportamiento del ligante y de la mezcla, así como el porcentaje de RAP, las condiciones de servicio, el clima, el tránsito y los requerimientos estructurales del proyecto.

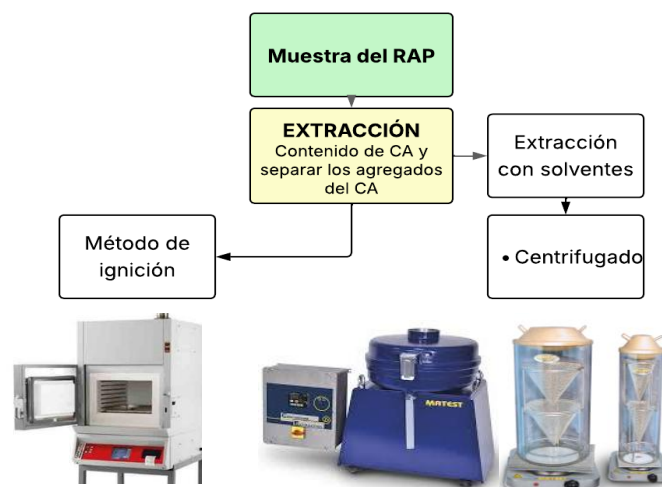
### **5.1.8 Métodos de extracción del ligante asfáltico de RAP**

Es relevante conocer algunas propiedades químicas y físicas del asfalto contenido en el RAP, ya que estas permiten evaluar el grado de envejecimiento del ligante y su posible desempeño dentro de una nueva mezcla asfáltica. Entre las propiedades de mayor interés se encuentran la composición química del ligante, la presencia de fracciones oxidadas, la variación en la proporción de asfaltenos y maltenos, así como

los cambios asociados a la oxidación, volatilización y endurecimiento del asfalto durante su vida útil. La extracción del asfalto contenido en el RAP es importante porque permite separar el ligante asfáltico del agregado mineral, cuantificar su contenido y obtener materiales adecuados para su evaluación. Este proceso es fundamental cuando se emplean mezclas con altos porcentajes de RAP (>20 %) ya que no solo interesa conocer la cantidad de asfalto presente, sino también el estado en el que se encuentra el ligante envejecido.

Mediante la extracción es posible recuperar el asfalto del RAP para analizar sus propiedades físicas, químicas como la rigidez, la viscosidad, el grado de envejecimiento y su respuesta ante deformaciones permanentes. Esta información permite determinar si el ligante recuperado puede incorporarse adecuadamente en una nueva mezcla asfáltica o si requiere el uso de aditivos rejuvenecedores.

En la Figura 7 se presentan los métodos disponibles para separar el asfalto del agregado cuando únicamente se requiere determinar el contenido de asfalto. Asimismo, se ilustran los procedimientos aplicables cuando es necesario caracterizar las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto recuperado, lo cual resulta especialmente relevante en mezclas con contenidos de RAP superiores al 20 %.



**Figura 7. Métodos disponibles para extracción del asfalto**

Fuente: Adaptado de Limeta Dionet et al. (2025)

### 5.1.9 Métodos para la separación del asfalto del agregado

La separación del ligante asfáltico del agregado mineral es una etapa importante en el análisis de mezclas asfálticas y materiales reciclados como el RAP. Su finalidad principal es determinar el contenido de asfalto y, en algunos casos, recuperar el agregado o el ligante para ensayos posteriores. Para contenidos bajos de RAP, generalmente menores al 10 %, suele ser suficiente conocer el contenido de asfalto y las propiedades del agregado recuperado.

Entre los métodos más utilizados para separar el asfalto del agregado se encuentran el método de ignición, la extracción por solvente mediante centrifugado, la extracción por reflujo. La selección del procedimiento depende del objetivo del ensayo, del tipo de material y de si se requiere conservar las propiedades del ligante recuperado.

#### **5.1.9.1 Método de ignición**

El método de ignición, establecido en AASHTO T 308 y ASTM D6307, consiste en eliminar el ligante asfáltico mediante combustión en un horno de ignición. Es uno de los procedimientos más empleados para determinar el contenido de asfalto, ya que permite obtener resultados rápidos y recuperar el agregado para realizar análisis granulométricos u otros ensayos.

Sin embargo, este método requiere aplicar un factor de corrección del agregado, debido a que algunos materiales pétreos pueden presentar pérdidas de masa al ser expuestos a temperaturas elevadas. En mezclas vírgenes, dicho factor se determina con muestras de contenido de asfalto conocido. En el caso del RAP, esto no siempre es posible, por lo que puede utilizarse un factor histórico cuando se tiene certeza de que los agregados provienen de la misma fuente. Además, no todos los agregados recuperados por ignición son adecuados para ciertos ensayos, ya que algunos pueden sufrir alteraciones por efecto del calor.

#### **5.1.9.2 Extracción por Disolvente Método A (Centrifugado) y B (Reflujo) de la Norma ASTM D2172**

Los procedimientos de extracción con solvente establecidos en ASTM D2172 se emplean para determinar de manera cuantitativa el contenido de ligante asfáltico en mezclas asfálticas y en muestras extraídas de pavimento. Además, el agregado

recuperado después del proceso puede utilizarse para realizar análisis granulométricos, de acuerdo con lo indicado en ASTM D5444.

En términos generales, estos métodos consisten en disolver el asfalto presente en la mezcla mediante un solvente apropiado, como tricloroetileno, bromuro de n-propilo o tolueno, utilizando el equipo correspondiente al procedimiento seleccionado. Una vez separado el ligante del agregado, el contenido de asfalto se obtiene por diferencia de masas. Para ello, se consideran la masa inicial de la muestra, la masa del agregado recuperado, la humedad presente, cuando esta se determina, y la cantidad de material mineral arrastrado en la solución asfalto–solvente. El resultado se expresa como porcentaje respecto a la masa seca de la mezcla.

Estos ensayos pueden aplicarse con distintos fines, entre ellos la aceptación de materiales, el control de calidad, la evaluación del desempeño de mezclas asfálticas y trabajos de investigación. Cada procedimiento de la norma define el tipo de equipo, los solventes permitidos y los reactivos que pueden utilizarse durante la extracción.

Después de la separación, es posible realizar ensayos adicionales al material recuperado. El agregado extraído puede someterse a análisis granulométrico, mientras que el ligante contenido en la solución puede recuperarse mediante procedimientos como ASTM D1856, ASTM D5404/D5404M o ASTM D7906, cuando se requiera estudiar sus propiedades. En este último caso, es indispensable remover completamente las partículas minerales presentes en el efluente, ya que podrían alterar los resultados de los ensayos del asfalto recuperado.

### **5.1.9.3 Extracción por Centrifugado, Método A**

Este procedimiento se realiza conforme a la norma ASTM D2172. Para ello, se coloca una muestra seca de mezcla asfáltica, generalmente de entre 500 y 3000 g, en el recipiente de extracción y se cubre con solvente, con el fin de facilitar la disolución del ligante. Posteriormente, se instala el anillo filtrante, se cierra herméticamente el equipo y se inicia la centrifugación, aumentando la velocidad de manera gradual hasta alcanzar un máximo aproximado de 3600 rpm.

Durante el ensayo se efectúan lavados sucesivos con solvente, recolectando la solución asfalto–solvente hasta que el líquido extraído presente una coloración pajiza clara, señal

de que la extracción ha sido suficiente. La norma recomienda realizar al menos tres lavados. Una vez concluido el proceso, el agregado se seca primero al aire y posteriormente en horno a  $110 \pm 5$  °C durante un periodo aproximado de 1 a 2 horas. Finalmente, se registra la masa seca del agregado y se determina el contenido de asfalto por diferencia.

Este procedimiento resulta útil para recuperar el agregado y emplearlo en análisis granulométricos posteriores. Sin embargo, por sí solo no se considera suficiente para obtener un ligante directamente apto para ensayos de propiedades, ya que para ello se requiere aplicar etapas adicionales de limpieza y recuperación del asfalto contenido en el solvente.

#### **5.1.9.4 Extracción por Reflujo, Método B**

Este procedimiento se realiza conforme a la norma ASTM D2172. En él, el solvente se calienta y recircula de manera continua sobre la mezcla asfáltica, favoreciendo la disolución progresiva del ligante. Para llevar a cabo el ensayo, la muestra se coloca en marcos metálicos provistos de elementos filtrantes, los cuales se introducen en un cilindro de vidrio resistente a altas temperaturas.

Una vez incorporado el solvente al sistema, se aplica calor mediante una placa calefactora hasta generar una ebullición controlada. El vapor producido asciende, se condensa y cae nuevamente sobre la muestra, permitiendo que el solvente actúe de forma continua sobre el material. Este ciclo se mantiene hasta que la solución recolectada adquiere una tonalidad clara, lo que indica que la mayor parte del asfalto ha sido removida del agregado.

Al finalizar la extracción, el equipo se apaga y se deja enfriar antes de retirar los marcos con el agregado, el cual posteriormente se seca en horno. El ligante separado permanece disuelto en el solvente, por lo que, si se requiere evaluar sus propiedades, debe aplicarse una etapa adicional de recuperación, como la evaporación rotatoria. Aunque este procedimiento demanda más tiempo que otros métodos, puede lograr una separación más completa del ligante y resulta conveniente para mezclas con porcentajes elevados de RAP.



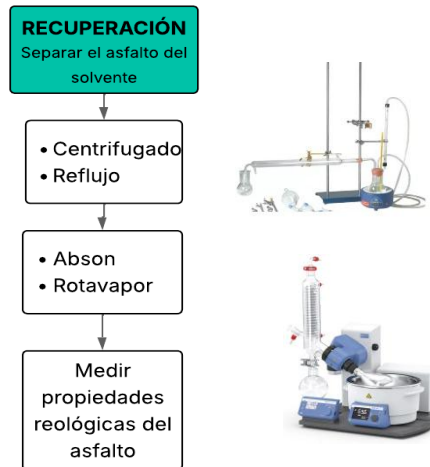
**Figura 8. Equipo de centrifugado y extractor por reflujo**

Fuente: Adaptado de Limeta Dionet *et al.* (2025)

### **5.1.10 Métodos de recuperación del ligante asfáltico**

Cuando se emplean porcentajes de RAP mayores al 15 %, resulta necesario evaluar el ligante asfáltico recuperado, debido a que sus características pueden afectar el comportamiento mecánico y la vida útil del pavimento. Para efectuar esta evaluación, primero se debe recuperar el asfalto presente en la solución obtenida durante la extracción, eliminando el solvente hasta obtener un residuo adecuado para los ensayos correspondientes.

La recuperación del ligante puede realizarse mediante distintos procedimientos. Uno de los más utilizados es el evaporador rotatorio, descrito en ASTM D5404, ya que permite retirar el solvente de manera eficiente y con un control más adecuado de la temperatura. Otra alternativa es el método Abson, indicado en ASTM D1856; no obstante, su uso es menos frecuente, debido a que algunos estudios han reportado que puede provocar un mayor envejecimiento del asfalto recuperado.



**Figura 9. Métodos disponibles para la recuperación del asfalto**

Fuente: Adaptado de Limeta Dionet *et al.* (2025)

#### 5.1.10.1 Evaporador rotatorio- ASTM D5404

La recuperación del ligante mediante evaporador rotatorio tiene como finalidad separar el asfalto del solvente empleado en la extracción, procurando conservar sus propiedades originales en la mayor medida posible. Para conocer las características del asfalto contenido en una mezcla asfáltica, primero es necesario disolverlo y separarlo del agregado con un solvente adecuado; posteriormente, el ligante debe recuperarse mediante un procedimiento que reduzca al mínimo cualquier modificación en su comportamiento físico o reológico.

El asfalto obtenido por este método puede evaluarse con los mismos ensayos aplicados al cemento asfáltico original, lo que permite comparar sus propiedades antes y después de haber sido incorporado en la mezcla o recuperado del pavimento. Por esta razón, el evaporador rotatorio es una técnica ampliamente utilizada cuando se requiere analizar el ligante recuperado.

En este procedimiento, la solución asfalto–solvente obtenida previamente, por ejemplo mediante extracción por centrifugado, se coloca en un matraz de destilación. Luego, el matraz se hace girar dentro de un baño de aceite caliente mientras se aplica vacío, favoreciendo la evaporación controlada del solvente. Durante el proceso se mantiene

una temperatura aproximada de 140 °C y se regula el paso de un gas inerte, como nitrógeno o dióxido de carbono, para facilitar la remoción del solvente y limitar la oxidación del ligante.

Conforme disminuye el volumen de la solución, puede incorporarse más extracto al matraz hasta completar la recuperación. Una vez eliminado la mayor parte del solvente, se aumenta el vacío y la velocidad de rotación para retirar posibles residuos remanentes, manteniendo estas condiciones durante un periodo aproximado de 10 minutos. Finalmente, el asfalto recuperado se vierte en un recipiente apropiado y queda disponible para realizar ensayos de caracterización, incluyendo pruebas destinadas a evaluar sus propiedades reológicas.



**Figura 10. Evaporador rotatorio**

Fuente: Adaptado de Limeta Dionet *et al.* (2025)

#### **5.1.10.2 Método Absón- ASTM D 1856**

El método Absón, establecido en la norma ASTM D1856, se utiliza para recuperar el ligante asfáltico contenido en una solución asfalto–solvente obtenida previamente mediante un proceso de extracción. Su objetivo es separar el solvente del asfalto para obtener un residuo que pueda emplearse en ensayos de caracterización.

En este procedimiento, el extracto asfáltico se somete a calentamiento controlado para evaporar la mayor parte del solvente. Posteriormente, se aplica una corriente de gas inerte, generalmente dióxido de carbono, con el fin de arrastrar los residuos de solvente que aún permanecen en el ligante. De esta manera, se busca obtener un asfalto recuperado con la menor cantidad posible de solvente remanente.

Una vez finalizada la recuperación, el ligante se vierte en un recipiente adecuado y puede utilizarse para evaluar propiedades como penetración, punto de ablandamiento, viscosidad o comportamiento reológico, según el objetivo del estudio. Sin embargo, este método se emplea con menor frecuencia que el evaporador rotatorio, debido a que el calentamiento y el contacto prolongado con el gas pueden favorecer cambios en las propiedades del asfalto, principalmente asociados al endurecimiento o envejecimiento del ligante recuperado.



**Figura 11. Equipo para recuperación del ligante- Método de Abson**

Fuente: Adaptado de Limeta Dionet *et al.* (2023)

### 5.1.11 Casos de estudio

En la literatura revisada, la selección de agentes rejuvenecedores se ha realizado principalmente mediante dos enfoques: primero, a partir de ensayos sobre el ligante recuperado, donde se busca restituir propiedades como penetración, viscosidad, punto de ablandamiento o grado PG; y segundo, mediante ensayos de desempeño en mezcla, tales como módulo dinámico, fatiga, ahuellamiento, susceptibilidad a la humedad y resistencia al agrietamiento. En general, la dosificación óptima se define como aquella que reduce la rigidez del ligante envejecido sin comprometer la resistencia a la deformación permanente ni la estabilidad de la mezcla.

Autor	Tipo de rejuvenecedor	Dosificaciones o formulación	Procedimiento de selección	Dosis óptima o recomendada
Zaumanis et al. (2014a)	Aceite vegetal residual, grasa vegetal residual, aceite orgánico, tall oil destilado, extracto aromático y aceite de motor usado	En el estudio de mezclas 100 % recicladas se aplicó una dosis de 12 % de rejuvenecedor; además, se reportaron rangos óptimos por PG: aceite vegetal residual 7.4–16.4 %, grasa vegetal residual 8.1–16.4 %, aceite orgánico 9.1–18.4 %, tall oil destilado 9.4–18.8 %, extracto aromático 11.5–27.8 % y aceite de motor usado 16.0–25.0 %	Se evaluó el ligante RAP con diferentes dosis hasta cumplir con el grado PG objetivo, considerando límites de alta, intermedia y baja temperatura	La dosis de 12 % funcionó para cinco de los seis rejuvenecedores; el aceite de motor usado requirió una dosis mayor para alcanzar el PG objetivo.
Zaumanis, et al. (2014b)	Rejuvenecedores aplicados al ligante RAP	Dosis variables según curvas de mezclado	Propusieron un método basado en especificaciones Superpave PG; la dosis mínima se fija por el requisito de baja o intermedia temperatura, y la dosis máxima por el requisito de alta temperatura	La dosis óptima es el intervalo que permite cumplir simultáneamente los criterios PG de alta, intermedia y baja temperatura.
Mogawer et al. (2013)	BituTech RAP, SonneWarmix RJT y SonneWarmix RJ	Para 40 % RAP: 0.5 % respecto al peso total de RAP, equivalente a 9.28 % respecto al ligante envejecido; para 5 % RAS: 1.64 % respecto al material reciclado; para 35 %	Se utilizó la dosificación recomendada por el fabricante y se mantuvo constante la relación respecto al ligante oxidado. Evaluaron	No establecieron una dosis óptima única; recomendaron revisar la dosificación porque algunas formulaciones mejoraron el

Autor	Tipo de rejuvenecedor	Dosificaciones o formulación	Procedimiento de selección	Dosis óptima o recomendada
		RAP + 5 % RAS: 0.64 % respecto al material reciclado	módulo dinámico, Hamburg Wheel Tracking, Overlay Tester, TSRST y grado de mezclado	agrietamiento, pero afectaron ahuellamiento y humedad.
Farooq, Mir y Sharma (2018)	Aceite de motor usado como rejuvenecedor; mezcla WMA con aditivo Evotherm	Para mezclas RAP:WMA de 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 y 60:40, las dosis óptimas fueron 10 %, 10–12.5 %, 12.5–17.5 %, 15–17.5 % y 17.5–20 %, respectivamente	Se evaluaron propiedades de mezclas WMA-RAP para determinar la dosis que mejora la trabajabilidad y mantiene propiedades mecánicas aceptables	Permitió incrementar el uso de RAP hasta 60 % en mezclas WMA; sin rejuvenecedor, el límite recomendado fue aproximadamente 20 % RAP.
Bilema et al. (2021)	Aceite de fritura residual y caucho molido	Para 25 % RAP: 2.7 % de WFO + 1.5 % de CR; para 40 % RAP: 4.6 % de WFO + 1.5 % de CR	La dosis de WFO se seleccionó con base en penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad; la dosis de CR se eligió buscando rigidez adecuada y buena trabajabilidad	La formulación recomendada fue 2.7 % WFO + 1.5 % CR para 25 % RAP, y 4.6 % WFO + 1.5 % CR para 40 % RAP.
Pasetto et al. (2021)	Aditivo rejuvenecedor comercial líquido	0.3 % respecto al peso del RAP; la mezcla de ligante quedó compuesta por 40 % ligante virgen y 60 % ligante envejecido rejuvenecido	La dosis se definió mediante caracterización empírica y reológica preliminar; después se evaluó mediante DSR y envejecimiento a corto y largo plazo	La dosis de 0.3 % permitió obtener una mezcla con comportamiento comparable o superior al ligante virgen de referencia.
Torres et al. (2020)	Ligantes modificados con polímeros usados como rejuvenecedores: PMB comercial, B160/220 + 5 % SBS, B160/220 + 4 % Regefalt; además, ligante de control con rejuvenecedor comercial	Formulaciones: 50 % ligante envejecido + 50 % PMB comercial; 50 % ligante envejecido + 45 % B160/220 + 5 % SBS; 50 % ligante envejecido + 46 % B160/220 + 4 % Regefalt; control con B70/100 + 3 % rejuvenecedor comercial	Compararon propiedades reológicas y mecánicas de mezclas con 50 % RAP, considerando fatiga, deformación permanente y sensibilidad al agua	No seleccionaron una sola dosis óptima; compararon formulaciones y mostraron que los ligantes modificados con polímeros pueden actuar como agentes rejuvenecedores en mezclas con alto RAP
Saltan y Khaliqi (2024)	Rejuvenecedor comercial incorporado al betún	2 %, 4 % y 6 % de rejuvenecedor, combinados con 35 %, 40 % y 45 % de RAP	Evaluaron resistencia indirecta a tracción y ahuellamiento en mezclas con altos contenidos de RAP	La combinación con 45 % RAP y 2 % de rejuvenecedor presentó el mejor comportamiento frente al ahuellamiento.

En términos generales, los estudios revisados muestran que la selección del

rejuvenecedor no debe basarse únicamente en su capacidad para ablandar el ligante envejecido, sino en el equilibrio entre recuperación reológica y desempeño mecánico de la mezcla. Zaumanis *et al.* 2014 emplearon criterios Superpave PG para definir rangos de dosificación capaces de restituir el grado de desempeño del ligante RAP, mientras que Farooq *et al.* y Bilema *et al.* determinaron las dosis óptimas mediante ensayos físicos, reológicos y mecánicos asociados con trabajabilidad, rigidez, humedad y deformación permanente. Por otro lado, Mogawer *et al.* utilizaron dosificaciones recomendadas por fabricantes, pero sus resultados evidenciaron la necesidad de ajustar la cantidad de rejuvenecedor mediante ensayos de desempeño, ya que una dosis inadecuada puede mejorar la resistencia al agrietamiento y, al mismo tiempo, incrementar la susceptibilidad al ahuellamiento o a la humedad. En consecuencia, el procedimiento más adecuado consiste en seleccionar inicialmente el rejuvenecedor con base en su compatibilidad con el ligante envejecido, definir una serie de dosificaciones tentativas, evaluar la recuperación del ligante mediante ensayos reológicos y, finalmente, verificar el desempeño de la mezcla reciclada mediante pruebas mecánicas.

## 6. METODOLOGIA

En la Figura 12 se presenta la secuencia metodológica del presente trabajo de investigación, la cual se desarrolló en el Laboratorio de Infraestructura, División de Asfaltos y Mezclas Asfálticas, del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

McDaniel y Anderson (2001), en su Reporte 452 del Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés), recomendaron que, en mezclas asfálticas que incorporaran más del 30 % de RAP, se realizara la extracción y recuperación del ligante asfáltico con el fin de analizar sus propiedades físicas y mecánicas. Con base en esta recomendación, en la presente investigación se llevó a cabo la extracción y recuperación del ligante asfáltico para evaluar sus propiedades físicas y químicas. Posteriormente, los aditivos fueron dosificados tanto con el ligante extraído Asf-1 como con un asfalto base Asf-2, con el propósito de considerar mezclas de diseño con 30 % de RAP.

Aunque en el planteamiento inicial del estudio se consideró el uso de tres aditivos rejuvenecedores, durante la ejecución experimental se decidió incorporar un cuarto

aditivo, a fin de enriquecer el análisis comparativo y obtener una evaluación más amplia de su influencia en el comportamiento del ligante. Por lo tanto, los materiales empleados en esta investigación fueron: el ligante extraído del RAP (Asf-1), un ligante asfáltico base (Asf-2) y cuatro aditivos rejuvenecedores (KA-918R, Iterlene ACF-2000 Green y Evoflex CA-9) los cuales fueron manejados durante la investigación con la siguiente nomenclatura:

**Tabla 3. Nomenclatura de los materiales durante la etapa de investigación.**

<b>Material</b>	<b>Nomenclatura</b>
Ligante asfáltico extraído del RAP	Asf-1
Asfalto base PG 70-16	Asf-2
KA-918R	Ad-1
Iterlene ACF-2000 Green	Ad-2
Evoflex CA-9	Ad-3
Danox RAP	Ad-4
Asfalto base + KA-918R	Asf-2 + Ad-1
Asfalto base (Asf-2) + Iterlene ACF-2000 Green	Asf-2 + Ad-2
Asfalto base (Asf-2) + Evoflex CA-9	Asf-2 + Ad-3
Asfalto base (Asf-2) +D anox RAP	Asf-2 + Ad-4
Mezcla 30% Ligante asfáltico extraído del RAP +70% Asfalto base + KA-918R	M-Asf-1+Asf-2 + Ad-1
Mezcla 30% Ligante asfáltico extraído del RAP +70% Asfalto base + Iterlene ACF-2000 Green	M-Asf-1+Asf-2 + Ad-2
Mezcla 30% Ligante asfáltico extraído del RAP +70% Asfalto base + Evoflex CA-9	M-Asf-1+Asf-2 + Ad-3
Mezcla 30% Ligante asfáltico extraído del RAP +70% Asfalto base + Danox RAP	M-Asf-1+Asf-2 + Ad-4

Fuente: Elaboración propia

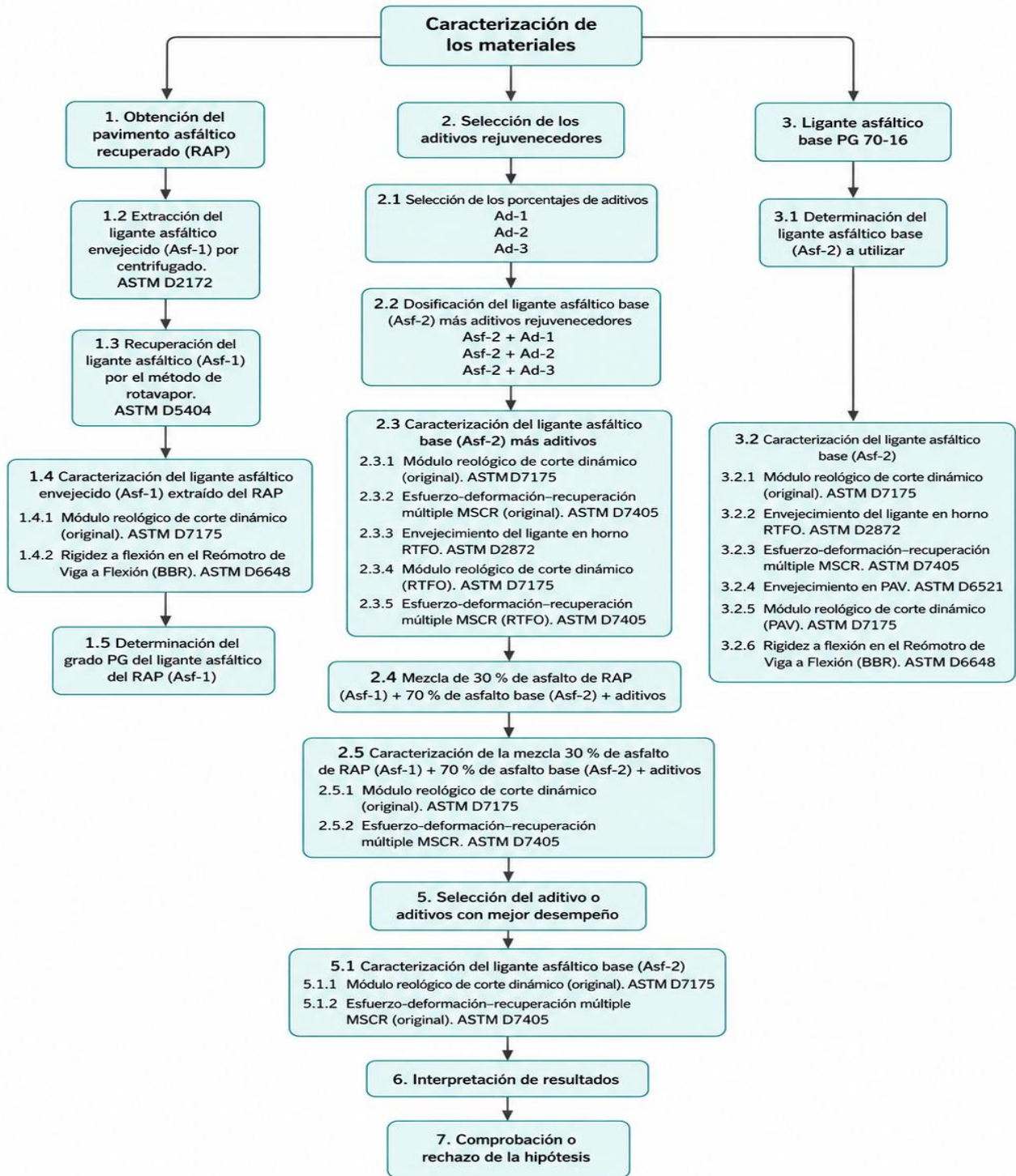


Figura 12. Esquema metodológico general.

Fuente: Elaboración propia

## 6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales es fundamental para garantizar que cumplan con las propiedades necesarias para su uso en mezclas asfálticas y para comprender su comportamiento en el pavimento.

### 6.1.1 Ligante asfáltico base

#### 6.1.1.1 Selección de un ligante asfáltico base (Asf-2)

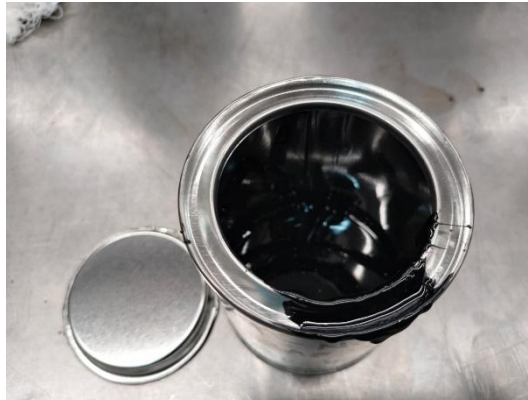
El cemento asfáltico base utilizado fue un PG 70-16, el cual fue caracterizado conforme a la norma *N·CMT·4·05·004/2025, Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, debe cumplir con los parámetros establecidos en la tabla 20.

De manera inicial, este asfalto debe cumplir con todos los parámetros establecidos en dicha normativa, ya que será utilizado en mezclas en un 70 % como ligante base con los cuatro aditivos Ad-1, Ad-2, Ad-3 y Ad-4, con el objetivo de reducir su grado de desempeño en temperatura alta de 70 °C a 58 °C.

**Tabla 20. Requisitos de calidad asfalto PG, N·CMT·4·05·004/2025**

Prueba	Unidad	Especificación
<i>Cemento asfáltico original</i>		
Módulo reológico de corte dinámico ( $G^*/\sin \delta$ )	kPa	1.0 Mín.
<i>Después de envejecimiento en horno rotatorio de película delgada (RTFO)</i>		
Pérdida por calentamiento a 163°C	%	<1.0 Máx.
Módulo reológico de corte dinámico ( $G^*/\sin \delta$ )	kPa	2.2 Mín.
<i>Envejecidos en la vasija de envejecimiento a presión (PAV)</i>		
Rigidez de flexión S(t)	MPa	300 Máx.
Valor m	---	0.300

Fuente: Elaboración propia



**Figura 31. Ligante asfáltico base PG 70-16 (Asf-2).**

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.1.2 Caracterización del ligante asfáltico base (Asf-2)**

#### **6.1.1.3 Envejecimiento del ligante en horno RTFO. ASTM D2872-22**

Se realizó el envejecimiento del ligante asfáltico en el horno de película delgada rotatoria RTFO, conforme a la normativa ASTM D2872. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron dos vasos con  $35 \pm 0.5$  g de ligante asfáltico cada uno, los cuales fueron colocados en el horno RTFO a una temperatura de  $163 \pm 0.5$  °C. Las muestras se mantuvieron durante 85 minutos, con una velocidad de rotación de  $15 \pm 2$  rpm, con el propósito de exponer uniformemente el ligante al calor y al aire durante el proceso de envejecimiento.

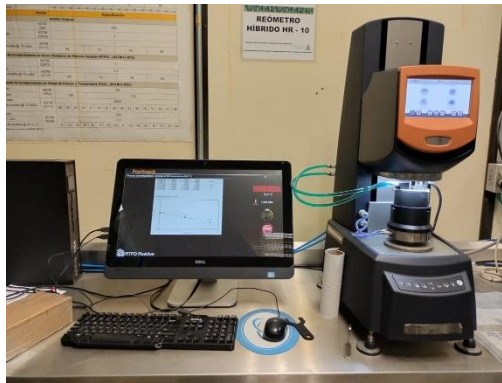


**Figura 32. Pesaje de la muestra.**

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.1.4 Módulo reológico de corte dinámico (original y RTFO). ASTM D7175-23

El ligante asfáltico se analizó en el DSR bajo la normativa ASTM D 7175 para obtener los valores de módulo de corte ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$  en condición original y RTFO, se analizó a temperatura de falla. La prueba consistió en aplicar un esfuerzo sinusoidal a una muestra de asfalto de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor, mediante dos platos paralelos. El DSR aplica un esfuerzo necesario para lograr que el material presente un 12 % de deformación a una frecuencia de 10 rad/s. El parámetro de cumplimiento es  $G^*/\text{sen } \delta$  mayor o igual 1 kPa para la condición original y 2.2 kPa mayor o igual para la condición después de RTFO.



**Figura 33. Ejecución del ensaye.**

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.1.5 Envejecimiento en PAV.ASTM D6521-22

El residuo obtenido del ensayo RTFO, realizado conforme a la norma ASTM D2872, fue sometido a un proceso de envejecimiento a largo plazo mediante la vasija de envejecimiento a presión, de acuerdo con la normativa ASTM D6521.

Para llevar a cabo el ensayo, se colocaron  $50 \pm 0.5$  g de ligante asfáltico envejecido en RTFO dentro de la vasija de envejecimiento. Posteriormente, la muestra fue sometida a una temperatura de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y a una presión de  $2.1 \pm 0.1$  MPa durante un periodo de 20 horas  $\pm$  10 minutos.

Una vez finalizado el proceso de envejecimiento a largo plazo, el ligante fue recuperado

para su posterior caracterización reológica. El material envejecido fue analizado mediante el DSR, conforme a la normativa correspondiente, con el propósito de obtener los valores de módulo complejo de corte ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y el parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$ . Asimismo, el residuo envejecido fue empleado para la realización del ensayo en el Reómetro de Viga a Flexión, con el fin de evaluar su comportamiento a bajas temperaturas.



**Figura 34. (A) Recuperación de muestra para ensaye en BBR, (B) Vasija de envejecimiento a presión (PAV).**

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.1.6 Módulo reológico de corte dinámico (PAV). ASTM D7175-23**

Una vez obtenido el residuo envejecido en PAV, este fue analizado mediante el DSR, con el propósito de determinar el módulo complejo de corte ( $G^*$ ), el ángulo de fase ( $\delta$ ) y el parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$ . Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento reológico del ligante asfáltico y su resistencia a la fatiga.

Para el ensayo en el DSR, se utilizó una muestra de ligante envejecido en PAV con 8 mm de diámetro y 1 mm de espesor, colocada entre dos platos paralelos. Durante la prueba, el equipo aplicó un esfuerzo sinusoidal al material hasta alcanzar una deformación del 1 %, a una frecuencia angular de 10 rad/s. Como criterio de cumplimiento, el valor del parámetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  debe ser menor o igual a 5000 kPa, lo cual indica un comportamiento adecuado del ligante frente al agrietamiento por fatiga.



**Figura 35. Elaboración de muestra de 8 mm.**

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.1.7 Rigidez a flexión en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR). ASTM D6648-16**

La prueba se realizó conforme a la normativa ASTM D6648, con la finalidad de evaluar la resistencia del ligante asfáltico al agrietamiento por contracción térmica cuando se encuentra expuesto a bajas temperaturas. Este ensayo permite determinar sus propiedades reológicas, así como su capacidad de relajación de esfuerzos.

Para la ejecución del ensayo se utilizó el residuo obtenido del envejecimiento a largo plazo mediante PAV, realizado de acuerdo con la norma ASTM D6521. Con este material se elaboraron vigas de ligante asfáltico con dimensiones de  $127 \pm 5$  mm de longitud,  $12.7 \pm 0.05$  mm de ancho y  $6.35 \pm 0.05$  mm de espesor.

Posteriormente, la muestra se colocó en un baño de agua a temperatura controlada y se le aplicó una carga constante de  $980 \pm 50$  mN durante un periodo de 240 segundos. A partir de este ensayo se determinaron el módulo de rigidez a flexión (*Stiffness, S*) y la relación de relajación (*m-value*).

La temperatura crítica se define como aquella en la cual el ligante cumple simultáneamente con los criterios establecidos: un valor de  $S \leq 300$  MPa y un *m-value*  $\geq 0.300$ . Estos límites indican un comportamiento adecuado del ligante frente a la fisuración térmica a bajas temperaturas.



**Figura 36. Elaboración de vigas.**

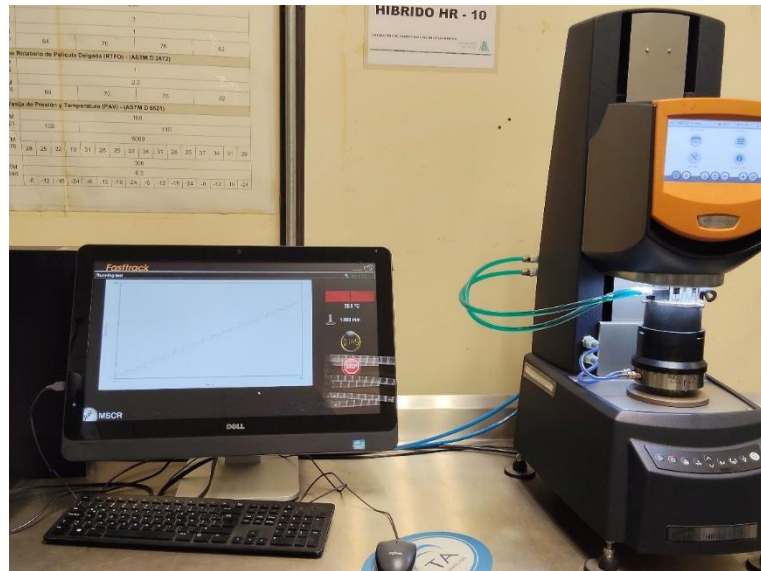
Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.1.8 Esfuerzo-deformación-recuperación múltiple (MSCR) ASTM D7405-24**

La prueba se realizó conforme a la normativa ASTM D7405, empleando una muestra del residuo obtenido en el ensayo ASTM D2872, correspondiente al envejecimiento del ligante asfáltico en el horno RTFO. con su desempeño frente al ahuellamiento en condiciones de servicio.

Para la ejecución del ensayo, el residuo envejecido fue analizado en el DSR. Se elaboró una muestra de ligante asfáltico de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor, la cual fue colocada entre los platos paralelos del equipo. Posteriormente, se aplicó un esfuerzo de 0.1 kPa durante 20 ciclos, seguido de un esfuerzo de 3.2 kPa durante 10 ciclos.

Cada ciclo estuvo compuesto por 1 segundo de aplicación de carga y 9 segundos de recuperación sin carga, dando una duración total de 10 segundos por ciclo. Este procedimiento permite observar la capacidad del ligante para deformarse bajo carga y recuperar parte de dicha deformación una vez retirada la sollicitación.



**Figura 37. Ejecución prueba MSCR.**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21. Resultados asfalto base Asf-2.**

Ensayo	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
<b>Condición original</b>				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	70 °C	G*	12.63 kPa	
		δ	78.9	
		G*/senδ	2.68 kPa	≥ 1 kPa
<b>Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2872-22</b>				
Cambio de masa	163 °C	CM	-0.444 %	≤ 1.0%
Recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR)	70 °C	Jnr 3.2	1.29 kPa <sup>-1</sup>	---
		RE 3.2	10.68 %	
<b>Envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-22</b>				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	31 °C	G*(senδ)	2550 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	-6 °C	S	67.6 MPa	≤ 300 MPa
		m	0.311	≥ 0.300

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.2 Obtención del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

El material RAP utilizado en la presente investigación fue obtenido de una única fuente de almacenamiento, con el propósito de asegurar la uniformidad y representatividad del material a lo largo de todo el proceso experimental. De esta fuente se recolectó la cantidad de muestra necesaria para la ejecución de todas las pruebas de laboratorio requeridas en el desarrollo del estudio. El RAP corresponde a material proveniente de una carpeta asfáltica existente, el cual fue previamente fresado y almacenado antes de su caracterización y evaluación.



**Figura 13. Muestreo del RAP en pila de almacenamiento.**

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.2.1 Secado en horno a 110°C

La muestra de RAP fue sometida a un proceso de secado en horno a una temperatura de 110 °C, con el objetivo de eliminar completamente la humedad presente en el material. Este paso es fundamental, ya que la presencia de agua puede interferir negativamente en el proceso de extracción del ligante asfáltico (Asf-1). La humedad residual puede alterar la eficiencia del solvente, provocar una extracción incompleta del asfalto y generar resultados imprecisos en la determinación del contenido real de ligante. Así mismo, el secado previo garantiza una mejor separación entre los agregados y el asfalto, contribuyendo a la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados

obtenidos durante el ensayo.



**Figura 14. Secado de muestra en horno.**

Fuente: Elaboración propia

### **6.1.3 Extracción del ligante asfáltico envejecido (Asf-1) por centrifugado, ASTM D2172**

La extracción del ligante asfáltico se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma *ASTM D2172*. Para ello, se preparó una muestra de RAP previamente seca, con una masa aproximada de 2 kg, la cual fue colocada en el recipiente del equipo de centrifugado. Posteriormente, la muestra fue cubierta con tricloroetileno y se dejó reposar durante 2 horas, con el fin de facilitar la disolución del asfalto contenido en la mezcla.

Una vez transcurrido el tiempo de reposo, el recipiente fue cerrado herméticamente para dar inicio al proceso de centrifugado. La velocidad del equipo se incrementó de manera progresiva hasta alcanzar 3600 rpm, permitiendo la separación del ligante disuelto del agregado pétreo. El procedimiento de lavado con solvente se repitió en varias ocasiones, recolectando el ligante extraído en cada ciclo.



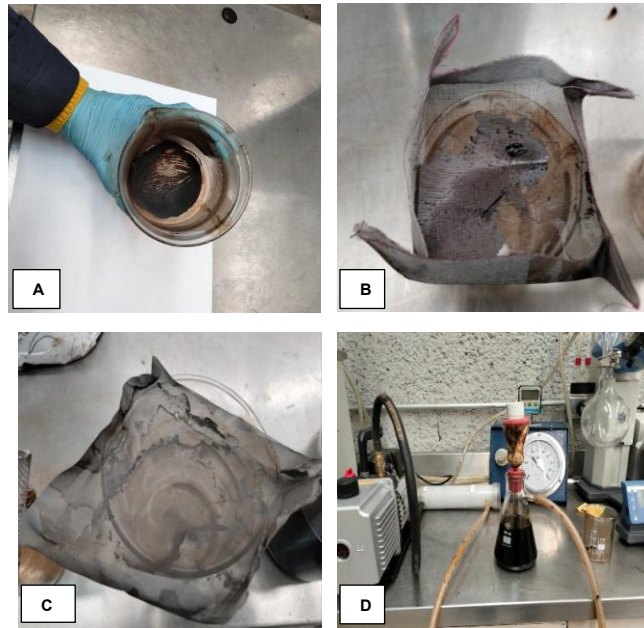
**Figura 15. Extracción del ligante en el Rotarex.**

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.3.1 Proceso de filtrado del residuo**

Durante el proceso de extracción del ligante asfáltico (Asf-1) mediante el equipo Rotarex se observó la presencia de material fino (polvo) en la solución ligante–solvente, proveniente de la fracción mineral del RAP. Inicialmente, se consideró que este material fino podría influir en la rigidez del asfalto y, en consecuencia, afectar la evaluación de sus propiedades reológicas.

Por tal motivo, una vez concluida la extracción, el residuo obtenido fue sometido a un proceso de filtración gradual, el cual consistió en el uso de tamices de 0.150 mm y 0.075 mm, seguido de un filtrado al vacío. Este último procedimiento se realizó mediante la aplicación de presión al vacío a través de un medio filtrante, permitiendo la remoción eficiente de partículas finas en suspensión, con el fin de minimizar la contaminación del ligante por sólidos minerales.



**Figura 16. (A) Presencia de material fino en el residuo, (B) Filtrado del residuo por tamiz de 0.150 mm, (C) Filtrado del residuo por tamiz de 0.075 mm, (D) Filtrado al vacío.**

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la necesidad de realizar el proceso de filtrado, se evaluaron las propiedades reológicas del ligante asfáltico mediante el DSR determinando los parámetros de módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ), tanto en el material filtrado como en el material sin filtrar.

Debido a la elevada rigidez del asfalto extraído del RAP, el análisis se llevó a cabo a partir de una temperatura inicial de 88 °C y se incrementó progresivamente hasta la falla del material, definida como la temperatura a la cual el parámetro  $G^*/\sin \delta$  dejó de cumplir con el valor especificado en la norma *N-CMT-4-05-004/25* Calidad de los materiales asfálticos. Grado PG, cuyo requisito mínimo para asfaltos en condición original es de 1 kPa.

**Tabla 4. Propiedades reológicas del ligante extraído del RAP (asfalto filtrado).**

Temperatura de ensayo (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)
88	3.51	77.1	3.6
94	1.91	79.7	1.94
100	1.05	81.9	1.06
106	0.588	83.8	0.591

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5. Propiedades reológicas del asfalto extraído del RAP (asfalto sin filtrar).**

Temperatura de ensayo (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)
88	3.47	77	3.56
94	1.85	79.6	1.88
100	1.01	81.9	1.02
106	0.559	83.8	0.562

Fuente: Elaboración propia

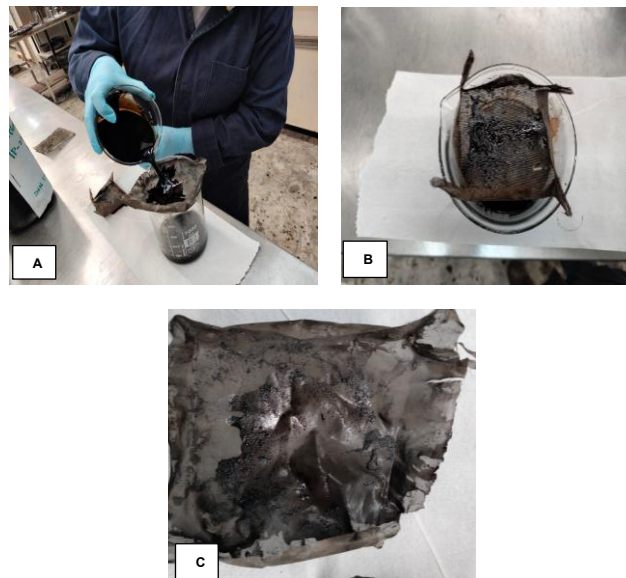
Con base en los resultados del análisis reológico, se determinó que el ligante asfáltico extraído del RAP presentó falla a una temperatura de 106 °C. Asimismo, el análisis realizado mediante el DSR evidenció que el ligante asfáltico presenta un comportamiento reológico similar tanto en la muestra filtrada como en la no filtrada.

Tal como se observa en las Tablas 4 y 5, ambas muestras registran valores muy próximos del módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y del ángulo de fase ( $\delta$ ), lo que demuestra que las diferencias entre ellas son mínimas. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, la presencia de partículas finas en el ligante RAP no genera variaciones apreciables en los parámetros reológicos analizados.

En consecuencia, se sugiere que el proceso de filtración, aun cuando permite la

eliminación de material fino, puede considerarse prescindible en la caracterización reológica del ligante asfáltico extraído del RAP, este proceso se puede omitir solamente para un tamaño de agregado de RAP comprendido entre 19 mm y 4.75 mm.

Adicionalmente, se evaluó la obtención del residuo de asfalto–tricloroetileno a partir de material RAP correspondiente a agregado fino, con tamaños comprendidos entre 4.75 mm y finos. Durante el proceso de extracción en el equipo Rotarex se observó una mayor presencia de material fino en comparación con el RAP proveniente de agregados gruesos. Por tal motivo, el residuo obtenido fue sometido a un proceso de filtración mediante tamices de 0.150 mm y, posteriormente, de 0.075 mm. En la figura 17, se observa el material retenido en cada uno de los tamices.



**Figura 17. (A) Proceso de filtrado, (B) Filtrado del residuo por tamiz de 0.150 mm, (C) Filtrado del residuo por tamiz de 0.075 mm.**

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el residuo filtrado y al constatar la presencia de una cantidad considerable de material fino, mostrado en la figura 18, se decidió no determinar los parámetros reológicos  $G^*$  y  $\delta$ , debido a que estas partículas podrían provocar daños, como rayaduras, en los platos paralelos del DSR.



**Figura 18. Presencia de material fino en tamiz.**

Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, el proceso de filtración, aun cuando permite eliminar el material fino presente en el ligante extraído, puede considerarse prescindible para la caracterización reológica del ligante asfáltico recuperado del RAP únicamente cuando el material evaluado corresponde a la fracción de agregado grueso con tamaños comprendidos entre 19 mm y 4.75 mm. Esta consideración se restringe a dicha fracción granulométrica, debido a que, como se mencionó anteriormente, en el RAP con tamaños de 4.75 mm a finos se observó una cantidad considerable de material fino durante el proceso de extracción. La presencia de estas partículas puede interferir en el análisis reológico, comprometer la representatividad de los resultados obtenidos y ocasionar daños, como rayaduras, en los platos paralelos del DSR.

#### **6.1.4 Recuperación del ligante asfáltico (Asf-1) por el método de Rotavapor, ASTM D 5404**

Una vez extraído el ligante asfáltico del RAP mediante centrifugado, se procedió a su recuperación utilizando el Rotavapor, siguiendo la norma *ASTM D5404*, con el objetivo de separar el asfalto del solvente sin alterar sus propiedades. Se colocaron 500 ml de la mezcla de tricloroetileno y ligante asfáltico al matraz de destilación del equipo, cuyo baño de aceite había sido previamente calentado a 140 °C. El matraz se hizo girar a 40 rpm y se aplicó inicialmente una presión de vacío de 80 kPa para iniciar la evaporación

del solvente, una vez que no se observó más condensación de tricloroetileno, se incrementó la presión de vacío a 5.3 kPa para eliminar algún residuo del solvente. Este procedimiento tuvo una duración aproximada de 15 minutos.

Posteriormente, el matraz se retiró del baño de aceite, se limpió el aceite adherido y se colocó invertido en un horno a 140 °C durante aproximadamente 15 minutos para completar la recuperación del ligante en un recipiente adecuado.



**Figura 19. Extracción mediante Rotavapor.**

Fuente: Elaboración propia

Para la ejecución de todas las pruebas contempladas en la presente investigación fue necesario disponer de un total de 400 g de ligante asfáltico recuperado a partir del RAP. Dado que la cantidad de ligante obtenida en cada ensayo fue limitada, el proceso se realizó de manera progresiva mediante pruebas sucesivas.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que cada prueba permitió recuperar aproximadamente 40 g de ligante asfáltico, utilizando un volumen promedio de 1500 ml de tricloroetileno. En consecuencia, para alcanzar la cantidad total requerida de 400 g de asfalto, fue necesario realizar un total de 10 pruebas, conforme a la relación directa entre la cantidad de ligante recuperado por ensayo y la cantidad total requerida.

El volumen total de tricloroetileno empleado durante el conjunto de pruebas fue de 5 L, el cual fue reutilizado, lo que permitió optimizar el uso del solvente y garantizar la eficiencia del procedimiento experimental.

De esta manera, la realización de 10 pruebas consecutivas permitió reunir la cantidad

total de ligante asfáltico necesaria para el desarrollo integral de la investigación, asegurando la disponibilidad del material requerido para la ejecución de los ensayos posteriores.

**Tabla 6. Resumen de las pruebas requeridas y del consumo de materiales.**

Descripción	Valor
Asfalto requerido para todas las pruebas	400 gr
Asfalto extraído del RAP por prueba	40 gr
Número de pruebas necesarias para obtener 400 gramos de asfalto	10 pruebas
Volumen de tricloroetileno utilizado por prueba	1500 ml (1.5 L)
Total de tricloroetileno utilizado	5 L (reutilizable)

Fuente: Elaboración propia

### **6.1.5 Caracterización del ligante asfáltico envejecido (Asf-1) extraído del RAP**

El ligante asfáltico recuperado del RAP fue analizado mediante el DSR, conforme a la norma ASTM D7175, con el propósito de evaluar su grado de envejecimiento y determinar su grado de desempeño PG, información fundamental para establecer su reutilización en mezclas asfálticas nuevas. Para ello, el asfalto recuperado fue evaluado de acuerdo con la normativa N·CMT·4·05·004/25, considerándolo como asfalto original. Con base en estas caracterizaciones, se determinó su grado de desempeño PG.

#### **6.1.5.1 Módulo reológico de corte dinámico (original). ASTM D 7175**

Debido a la alta rigidez del ligante envejecido, los ensayos se iniciaron a una temperatura de 88 °C para evitar daños al equipo. La muestra se colocó cuidadosamente en el DSR, asegurando un contacto adecuado con los platos y manteniendo la temperatura constante durante la prueba.

Los ensayos se realizaron por duplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados, los cuales se presentan en la Tabla 7. A partir de estos resultados, se determinó que a 100 °C el ligante cumple con el valor mínimo de 1 kPa de  $G^*/\text{sen } \delta$ , de acuerdo con la norma N-CMT-4-05-004/25, lo que permite determinar el nivel de envejecimiento del material.

**Tabla 7. Resultados  $G^*/\text{sen } \delta$  del asfalto del RAP.**

Ensayo	Temperatura (°C)	$G^*$ (kPa)	$\delta$ (°)	$G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)
1	88	3.51	77.1	3.60
2		3.47	77.0	3.56
1	94	1.91	79.7	1.94
2		1.85	79.6	1.88
1	100	1.05	81.9	1.06
2		1.01	81.9	1.02
1	106	0.59	83.8	0.59
2		0.56	83.8	0.56

Fuente: Elaboración propia



**Figura 20. Elaboración de la muestra para reología.**

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.5.2 Rigidez a flexión en el Reómetro de Viga a Flexión (BBR). ASTM D6648

El ligante asfáltico fue evaluado a bajas temperaturas mediante el BBR, conforme a la normativa **ASTM D 6648**, con el objetivo de analizar su comportamiento reológico y su susceptibilidad al agrietamiento térmico.

El ensayo se llevó a cabo a dos temperaturas de evaluación, 0 °C y -18 °C, seleccionadas con el propósito de caracterizar el desempeño del ligante dentro del rango de bajas temperaturas y obtener información suficiente para la posterior determinación de la temperatura crítica de falla.

Para cada temperatura se midieron los parámetros de rigidez de flexión,  $S(t)$ , y pendiente de la curva de relajación,  $m$ , a un tiempo de carga de 60 segundos, conforme a lo establecido por la norma.

Los resultados de los ensayos realizados a ambas temperaturas, presentados en la Tabla 8, permitieron evaluar la variación de los parámetros reológicos del ligante asfáltico en función de la temperatura, proporcionando la base experimental necesaria para la posterior determinación de la temperatura a la cual el material deja de cumplir con los criterios de desempeño a bajas temperaturas.

**Tabla 8. Resultados ensaye de viga a flexión en BBR del RAP.**

Ensayo	Temperatura (°C)	S(t) (MPa)	m -value
1	-18	440.00	0.2
2	0	52.40	0.4

### 6.1.6 Determinación de las temperaturas críticas del ligante del RAP

La temperatura crítica se define como el valor de temperatura específico en el cual se cumple un determinado criterio de resistencia del material. Este criterio puede estar asociado a diferentes tipos de comportamiento mecánico, como la resistencia a la

deformación plástica (fluencia) o a la fractura, dependiendo de las condiciones de servicio y las propiedades del asfalto. Es fundamental identificar esta temperatura porque marca el límite operativo para el asfalto.

Temperatura crítica (T<sub>c</sub>):

- DSR (reómetro de corte)

$$T_c (\text{Alta original}) = \left( \frac{\log(1.0) - \log(G_1)}{a} \right) + T_1 \quad (1)$$

Fuente: (McDaniel y Anderson,2001)

**Donde:**

G<sub>1</sub> = El valor de G\*/senδ a una temperatura específica, T<sub>1</sub>.

a = la pendiente de la curva rigidez–temperatura.

- BBR (reómetro a flexión)

$$T_c (\text{Baja } m) = \left( \frac{0.300 - m_1}{a} \right) + T_1 \quad (2)$$

Fuente: (McDaniel y Anderson,2001)

**Donde:**

m<sub>1</sub> = El valor *m* a una temperatura específica, T<sub>1</sub>

a = Pendiente de la curva descrita

$$T_c (\text{Baja } S) = \left( \frac{\log(300) - \log(S_1)}{a} \right) + T_1 \quad (3)$$

Fuente: (McDaniel y Anderson,2001)

**Donde:**

S1 = El valor de rigidez (S) a una temperatura específica, T1.

a = La pendiente de la curva rigidez–temperatura.

### 6.1.7 Calculo de temperaturas criticas

#### Tc (Alta original)

**Tabla 9. Obtencion de temperaturas criticas (Alta).**

Temperatura de ensayo (°C)		G*/senδ (kPa)	Log (G*/senδ)	
100	T1	1.06	0.025	G1
106	T2	0.591	-0.228	G2

Fuente: Elaboración propia

**Cálculo valor a**

$$a = \frac{G_2 - G_1}{T_2 - T_1}$$

Sustituyendo valores

$$a = \frac{-0.228 - 0.025}{106 - 100}$$

$$a = -0.0422$$

$$T_c(\text{Alta Orig}) = \left( \frac{\log(1.0) - \log(G_1)}{a} \right) + T_1$$

Sustituyendo valores

$$T_c(\text{Alta Orig}) = \left( \frac{0 - 0.025}{-0.0422} \right) + 100$$

$$T_c(\text{Alta Orig}) = 100.6$$

Tc (Baja S)

**Tabla 10. Temperaturas críticas (Baja).**

Temperatura de ensayo (°C)		Measured stiffness (Mpa)	Log (Measured stiffness)		m-value	
0	T1	52.4	1.719	S1	0.387	m1
-18	T2	440	2.643	S2	0.244	m2

Fuente: Elaboración propia

**Cálculo valor a**

$$a = S2 - S1/T2-T1$$

Sustituyendo valores

$$a = ((1.719 - 2.643)/(0)-(-18))$$

$$a = -0.051$$

$$T_c(\text{Baja } S) = \left( \frac{\log(300) - \log(S_1)}{a} \right) + T_1$$

Sustituyendo valores

$$T_c(\text{Baja } S) = \left( \frac{2.477 - 1.719}{-0.051} \right) + 0$$

$$T_c(\text{Baja } S) = -14.27$$

Tc (Baja m)

**Cálculo valor a**

$$a = m_2 - m_1 / T_2 - T_1$$

Sustituyendo

$$a = (0.244 - 0.387) / ((0) - (-18))$$

$$a = 0.007$$

$$T_c(\text{Baja } m) = \left( \frac{0.300 - m_1}{a} \right) + T_1$$

Sustituyendo

$$T_c(\text{Baja } m) = \left( \frac{0.3007 - 0.387}{0.007} \right) + 0$$

$$T_c(\text{Baja } m) = -11$$

**Tabla 11. Grado PG del asfalto producto de RAP.**

<b>Asfalto</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Temperatura de prueba</b>	<b>Tc</b>
RAP Original	DSR- G*/senδ	Alta	100.6
	BBR-S	Baja	-24.27
	BBR-m	Baja	-21

Fuente: Elaboración propia

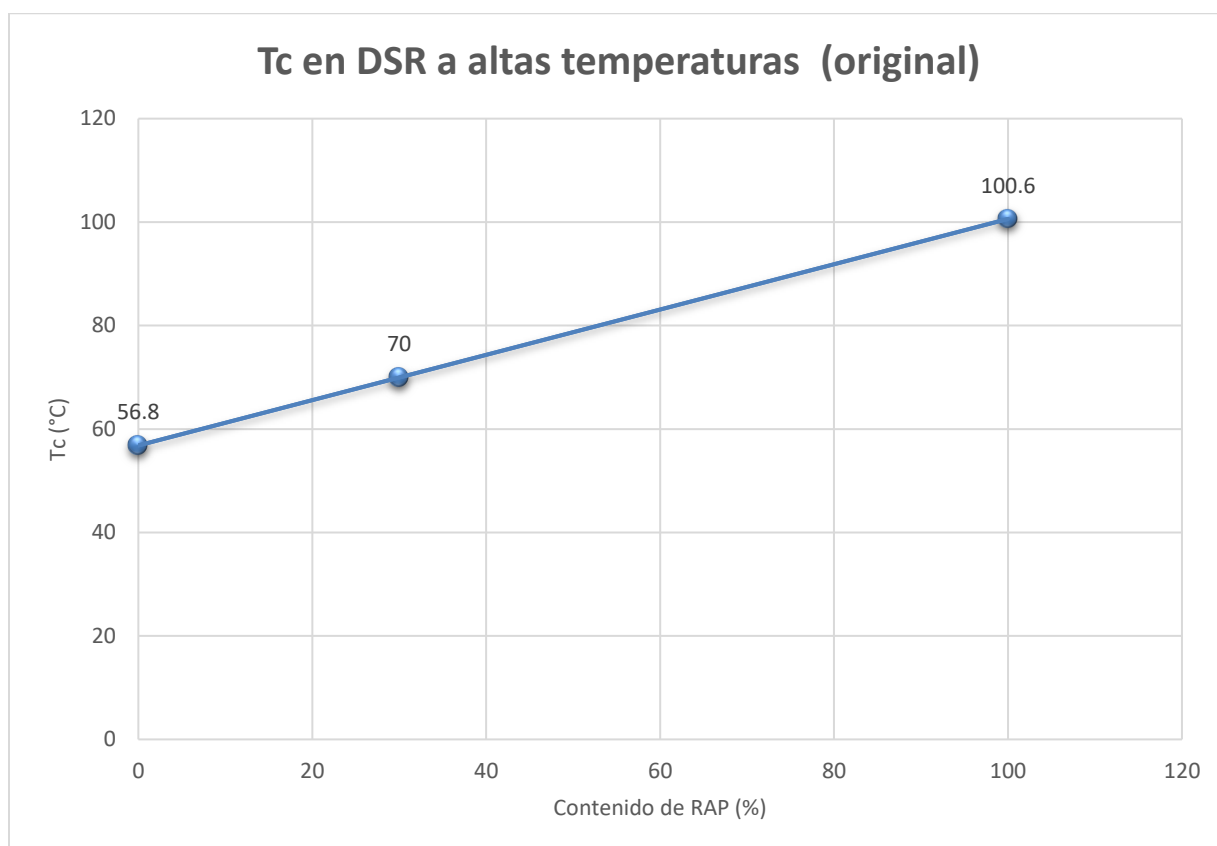
**PG actual a Tc: PG 100.6-21**

**6.1.8 Determinación del grado PG del nuevo asfalto a mezclar a partir de las temperaturas críticas del RAP.**

Con base en las temperaturas críticas obtenidas del ligante asfáltico extraído del RAP mostradas en la Tabla 11, se procedió a calcular el grado de desempeño del asfalto base requerido para su mezcla con los aditivos rejuvenecedores. Este análisis permitió identificar las condiciones en las que se encuentra el asfalto extraído del RAP lo que orientó la selección del grado de asfalto más adecuado para la investigación. Considerando dichas condiciones y con el propósito de alcanzar un equilibrio entre desempeño a altas y bajas temperaturas, se definió como PG objetivo o asfalto de aporte un asfalto PG 70-16, el cual servirá como referencia para evaluar la efectividad de los aditivos rejuvenecedores en la restauración de las propiedades del ligante envejecido.

Se calcularon las temperaturas críticas en función del contenido de RAP a incorporar en mezclas nuevas (30 %) para esta investigación. Los resultados muestran que, para alcanzar un PG objetivo de 70 °C en la temperatura alta, y sea posible adicionar hasta

un 30 % de RAP sin comprometer el desempeño, en el caso de emplear 100 % de RAP, el ligante envejecido presenta un grado de desempeño de 100.6 °C, lo que evidencia su alta rigidez y la necesidad de definir el tipo de asfalto base que deberá mezclarse con los aditivos rejuvenecedores y el RAP para así poder restaurar sus propiedades. Finalmente, al considerar una mezcla con 0 % de RAP, se determinó que el ligante base requerido corresponde a un PG 56.8 °C en la temperatura alta, valor que servirá como punto de referencia para el diseño de las combinaciones.



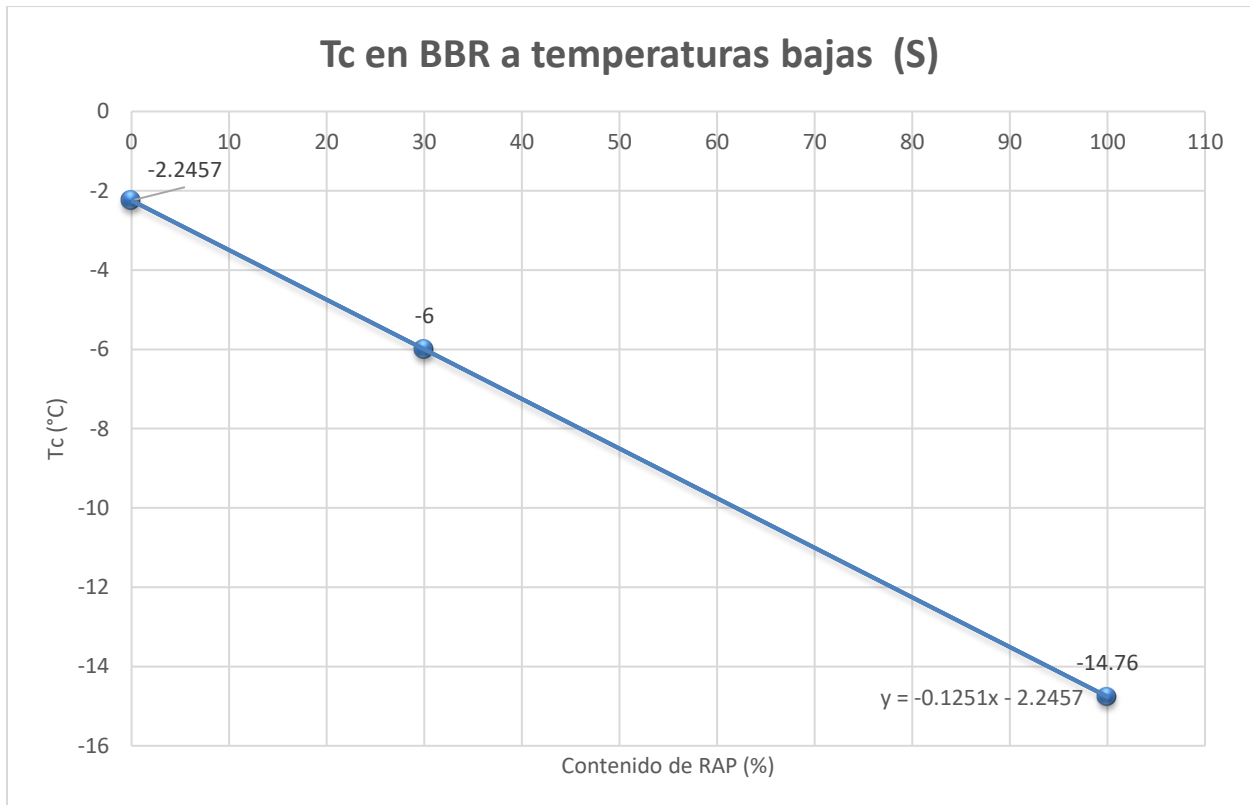
T(°C)	Contenido de RAP
70	30
100.6	100
56.8	0

**Figura 21. Determinación de Tc en DSR a altas temperaturas (original).**

Fuente: Elaboración propia

También fue necesario calcular las temperaturas críticas del RAP en las temperaturas

bajas (s y m) para determinar si era necesario ajustar el asfalto producto de RAP en la temperatura baja. En el caso de emplear 100 % de RAP, el ligante envejecido presenta un grado de desempeño en el parámetro de S de  $-14.76^{\circ}\text{C}$  y al considerar una mezcla con 0 % de RAP, se determinó que el ligante base requerido corresponde a un PG  $-12.2^{\circ}\text{C}$  en la temperatura baja, valor que servirá como punto de referencia para el diseño de las combinaciones.

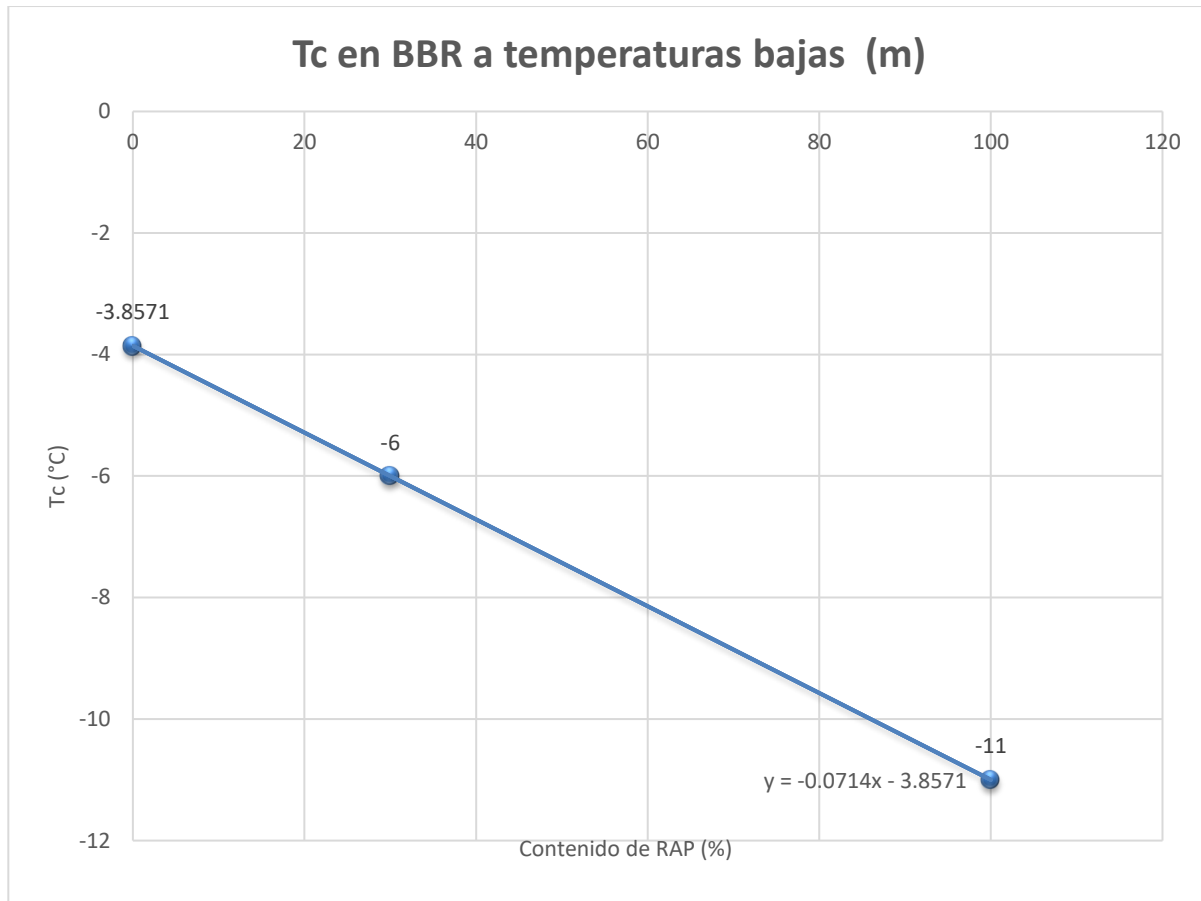


T (°C)	Contenido RAP
-6	30
-14.76	100
-2.2457	0

**Figura 22. Determinación de Tc en BBR a bajas temperaturas (S).**

En el caso del parámetro m, al emplear un 100 % de RAP, el ligante envejecido presenta un grado de desempeño en el parámetro de m de  $-11^{\circ}\text{C}$  y al considerar una mezcla con

0 % de RAP, se determinó que el ligante base requerido corresponde a un PG -13.8 °C en la temperatura baja, debido a los valores obtenidos en las temperaturas bajas se demuestra que no es necesario ajustar la temperatura baja del RAP ya que presenta una buena sin rigidez sin comprometer su desempeño a temperaturas bajas, por lo tanto se puede trabajar con el PG objetivo base de -16° C, ya que el valor de s y m satisfacen con la temperatura baja del PG objetivo base.



T(°C)	Contenido de RAP
-6	30
-11	100
-3.8571	0

**Figura 23. Determinación de Tc en BBR a bajas temperaturas (m).**

### 6.1.9 Determinación de grado PG requerido del asfalto nuevo

En función de las temperaturas críticas obtenidas en el asfalto del RAP, se determinó el grado PG del asfalto base que servirá como referencia en el diseño de las mezclas. El análisis indicó que el ligante requerido corresponde a un PG 56.8-12.2, seleccionado para lograr un equilibrio entre el desempeño a altas temperaturas (56.8 °C) y la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas (-12.2 °C). Este será el asfalto base con el cual se trabajará en combinación con los aditivos rejuvenecedores y el RAP.

**Tabla 12. Temperaturas críticas del nuevo asfalto a utilizar.**

Asfalto	Propiedad	Temperatura de prueba	Tc
Original	DSR- G*/senδ	Alta	56.8
PAV	BBR-S	Baja	-12.2
	BBR-m	Baja	-13.8

**PG actual a Tc: PG 56.8-12.2**

Para obtener una mezcla asfáltica con grado de desempeño final PG 70-16, considerando una incorporación de 30 % de RAP con grado PG 100.6-21, se requiere que el 70 % restante de la mezcla corresponda a un asfalto nuevo con grado aproximado PG 56.8-12.2. De esta manera, la combinación de ambos ligantes permitiría alcanzar el grado objetivo PG 70-16:

70 % de asfalto nuevo PG 56.8-12.2 + 30 % de ligante RAP PG 100.6-21 = 100 % de ligante combinado PG 70-16.

**6.1.10 Determinación del porcentaje óptimo de aditivo para lograr el asfalto nuevo requerido PG 56.8-12.2**

Se prepararon distintas dosificaciones con los 4 aditivos rejuvenecedores (Ad-1, Ad-2, Ad-3 y Ad-4) mezclados con un asfalto PG 70-16 utilizado inicialmente como asfalto

base o asfalto de aporte con el objetivo de que los aditivos rejuvenecedores logaran bajar el grado PG de este asfalto a un PG 56.8-12.2 que fue determinado en base a las temperaturas críticas del RAP, y alcanzar un grado de desempeño cercano a PG 56.8-12.2.

Las diferentes dosificaciones se evaluaron mediante el DSR en condición original, conforme a la norma ASTM D7175-25. Con base en los resultados obtenidos, se seleccionó la formulación óptima que permitió alcanzar un grado de desempeño cercano a PG 56.8.

Dado que en la práctica industrial no existe un asfalto comercial con clasificación PG 56.8, se tomó como referencia el valor correspondiente a la temperatura de 58°C, el cual se aproxima al asfalto PG 56.8 que fue determinado en base a las temperaturas críticas del RAP. Los resultados demostraron que los aditivos rejuvenecedores efectivamente modificaron el grado PG del asfalto base tomado inicialmente logrando reducirlo de un PG 64 a un PG 58 con la dosis óptima mostrada en la Tabla 13.

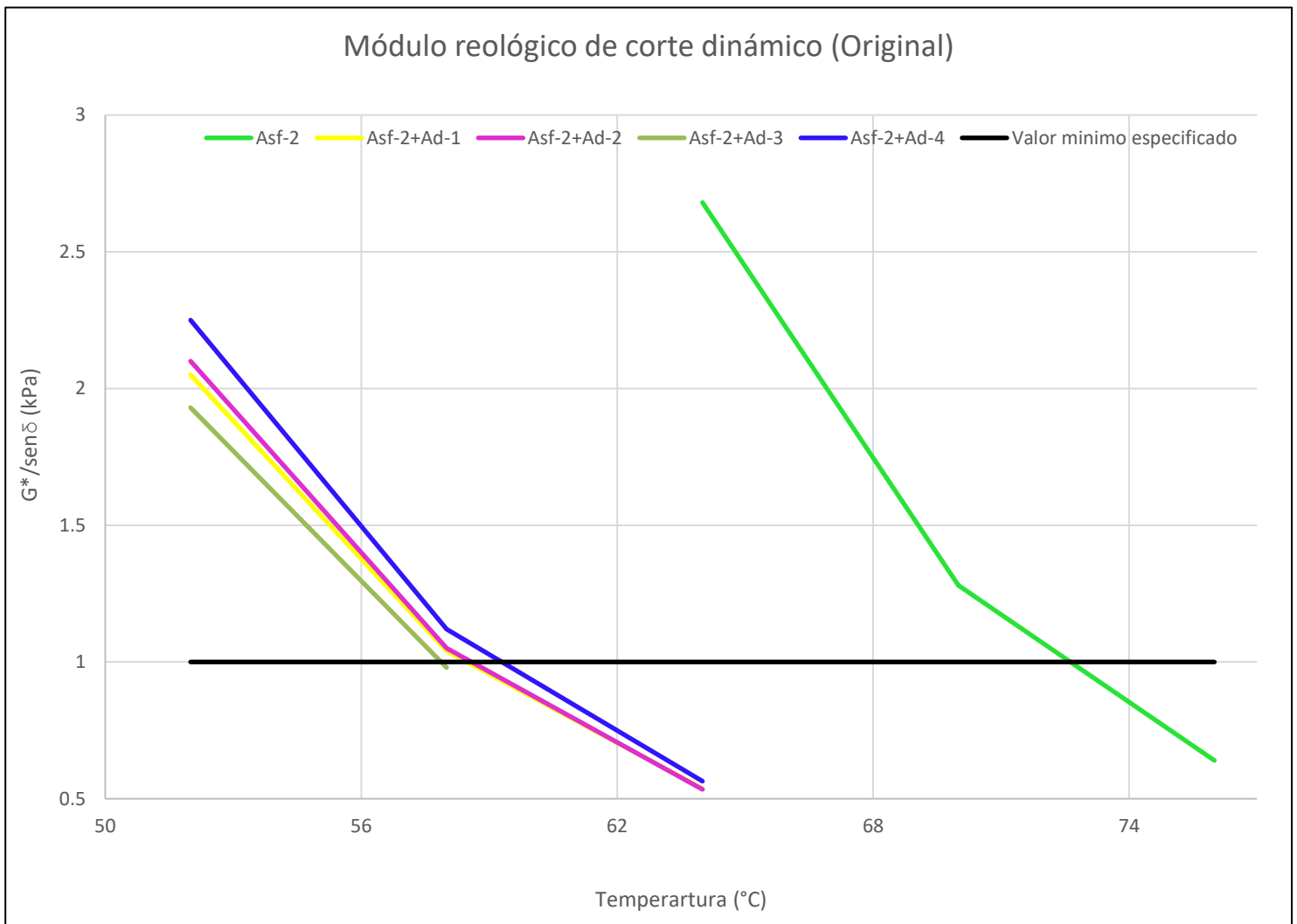
#### 6.1.10.1 Módulo reológico de corte dinámico (original). ASTM D7175.

**Tabla 13. Resultados modulo reológico de corte dinámico (original).**

<b>Aditivo</b>	<b>Aditivo %</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (kPa)</b>	<b>δ (°)</b>	<b>G*/senδ (kPa)</b>
Asf-2	0%	64	2.63	78.9	2.68
		70	1.26	81.6	1.28
		76	0.637	83.9	0.64
Asf-2+Ad-1	10	52	2.03	80.4	2.05
		<b>58</b>	<b>1.03</b>	<b>82.7</b>	<b>1.04</b>
		64	0.534	84.6	0.537
Asf-2+Ad-2	5.5	52	2.08	81.6	2.1
		<b>58</b>	<b>1.04</b>	<b>83.7</b>	<b>1.05</b>
		64	0.533	85.3	0.534
Asf-2+Ad-3	6.8	52	1.91	81.1	1.93

		<b>58</b>	<b>0.973</b>	<b>83.3</b>	<b>0.98</b>
Asf-2+Ad-4	6.5	52	2.21	78.5	2.25
		<b>58</b>	<b>1.1</b>	<b>81.2</b>	<b>1.12</b>
		64	0.561	83.4	0.564

Fuente: Elaboración propia



**Figura 24. Comparación del  $G^*/\text{sen}\delta$  con los 4 aditivos (original).**

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.10.2 Prueba de MSCR ASTM D 7405-24 (condición original)

Una vez obtenida la dosificación óptima del aditivo rejuvenecedor, que permitió modificar las propiedades del asfalto base inicial PG 70 hacia un grado de desempeño cercano a PG 56.8, se realizó la prueba MSCR, conforme a la norma ASTM D7405-25.

El ensayo se efectuó en el DSR con la finalidad de evaluar el comportamiento viscoelástico del asfalto modificado con los aditivos, específicamente su resistencia a la deformación permanente y su capacidad de recuperación elástica ante cargas repetidas.

A partir de los parámetros obtenidos, cumplimiento no recuperable (Jnr) y porcentaje de recuperación (RE%), fue posible determinar el efecto del aditivo sobre el desempeño del asfalto base, verificando que la mezcla seleccionada no solo ajustó su grado PG, sino que también mantuvo un comportamiento adecuado frente a esfuerzos de carga y temperatura, lo que confirmó la efectividad del rejuvenecedor en la mejora del ligante base previo a su aplicación sobre el asfalto recuperado del RAP.

**Tabla 14. Resultados ensaye MSCR Asf-2 mas aditivos (original).**

<b>Aditivo</b>	<b>% Aditivo</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>jnr a 3.2 kPa</b>	<b>Respuesta elástica a 3.2 kPa</b>
Asf-2	0%	58	1.38	6.95
Asf-2+Ad-1	10	58	9.78	-0.28
Asf-2+Ad-2	5.5	58	9.64	-0.19
Asf-2+Ad-3	6.8	58	11.9	-0.41

Asf-2+Ad-4	6.5	58	9.91	0.07
------------	-----	----	------	------

Fuente: Elaboración propia

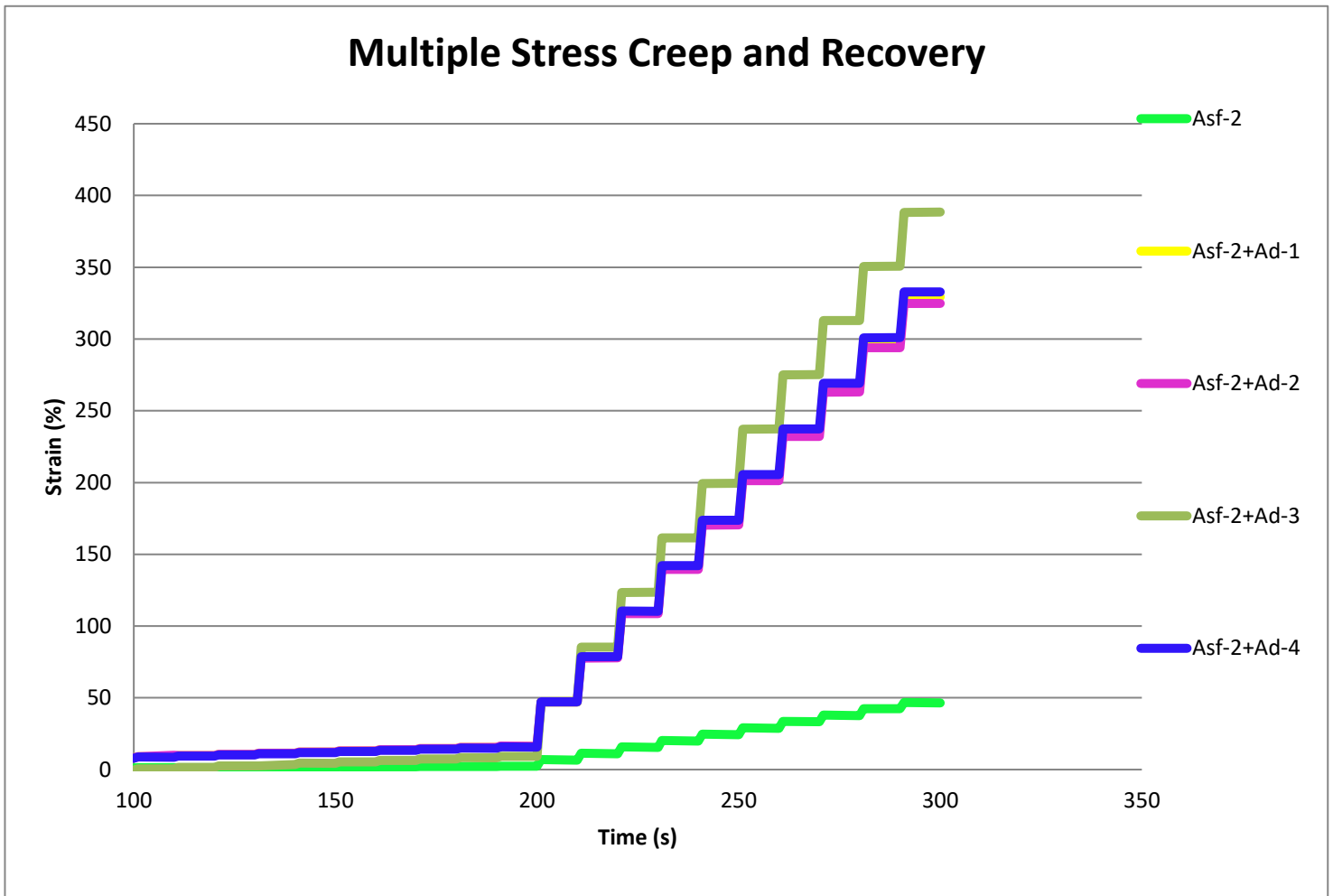


Figura 25. MSCR con aditivos (original).

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.10.3 Envejecimiento del ligante en horno RTFO. ASTM D2872

La prueba de pérdida por calentamiento simula el envejecimiento a corto plazo del asfalto durante los procesos de mezcla y colocación. En este estudio, las mezclas de asfalto base con la dosis óptima de cada aditivo rejuvenecedor fueron sometidas a

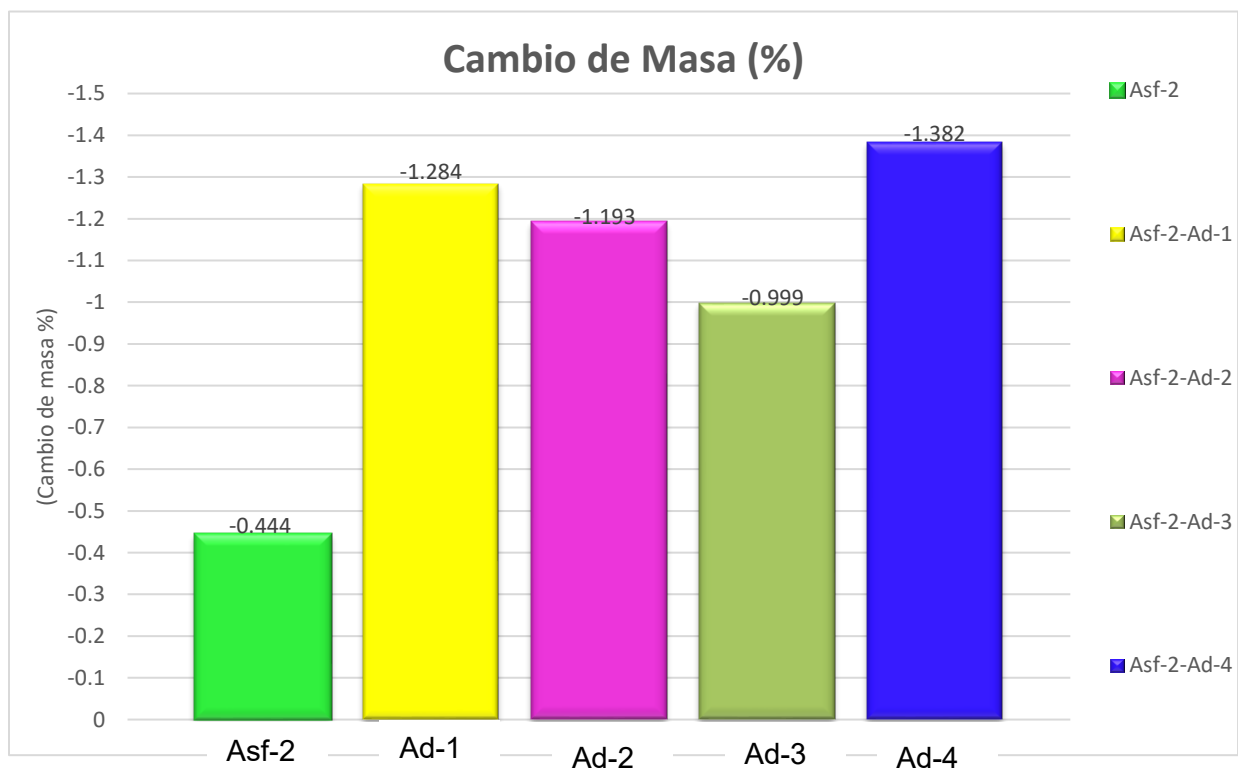
envejecimiento acelerado en horno RTFO, con el fin de reproducir de manera controlada los efectos del endurecimiento térmico y oxidativo que ocurren durante las primeras etapas de vida del pavimento.

La Figura 26 muestra el cambio de masa registrado para el asfalto base y para las mezclas modificadas con los aditivos rejuvenecedores. El asfalto base, identificado como Asf-2, presentó una pérdida de masa de -0.444 %. Por su parte, la mezcla Asf-2-Ad-1 registró una pérdida de -1.284 %, la mezcla Asf-2-Ad-2 presentó una pérdida de -1.193 %, la mezcla Asf-2-Ad-3 obtuvo una pérdida de -0.999 % y la mezcla Asf-2-Ad-4 alcanzó una pérdida de -1.382 %. Estos resultados evidencian que la incorporación de los aditivos rejuvenecedores incrementó la pérdida de masa durante el envejecimiento en RTFO, posiblemente debido a la presencia de componentes más volátiles en su composición. Entre las mezclas modificadas, Asf-2-Ad-3 presentó la menor pérdida de masa, mientras que Asf-2-Ad-4 registró la mayor pérdida.

**Tabla 15. Resultados cambio de masa Asf-2 mas aditivos.**

<b>Aditivo</b>	<b>% Aditivo</b>	<b>Temp. de ensayo (°C)</b>	<b>Cambio de masa (%)</b>
Asf-2	0%	163	-0.444
Ad-1	10	163	-1.122
Ad-2	5.5	163	-0.923
Ad-3	6.8	163	-0.733
Ad-4	6.5	163	-1.427

Fuente: Elaboración propia



**Figura 26. Cambio de masa Asf-2 más porcentaje óptimo aditivos.**

Fuente: Elaboración propia

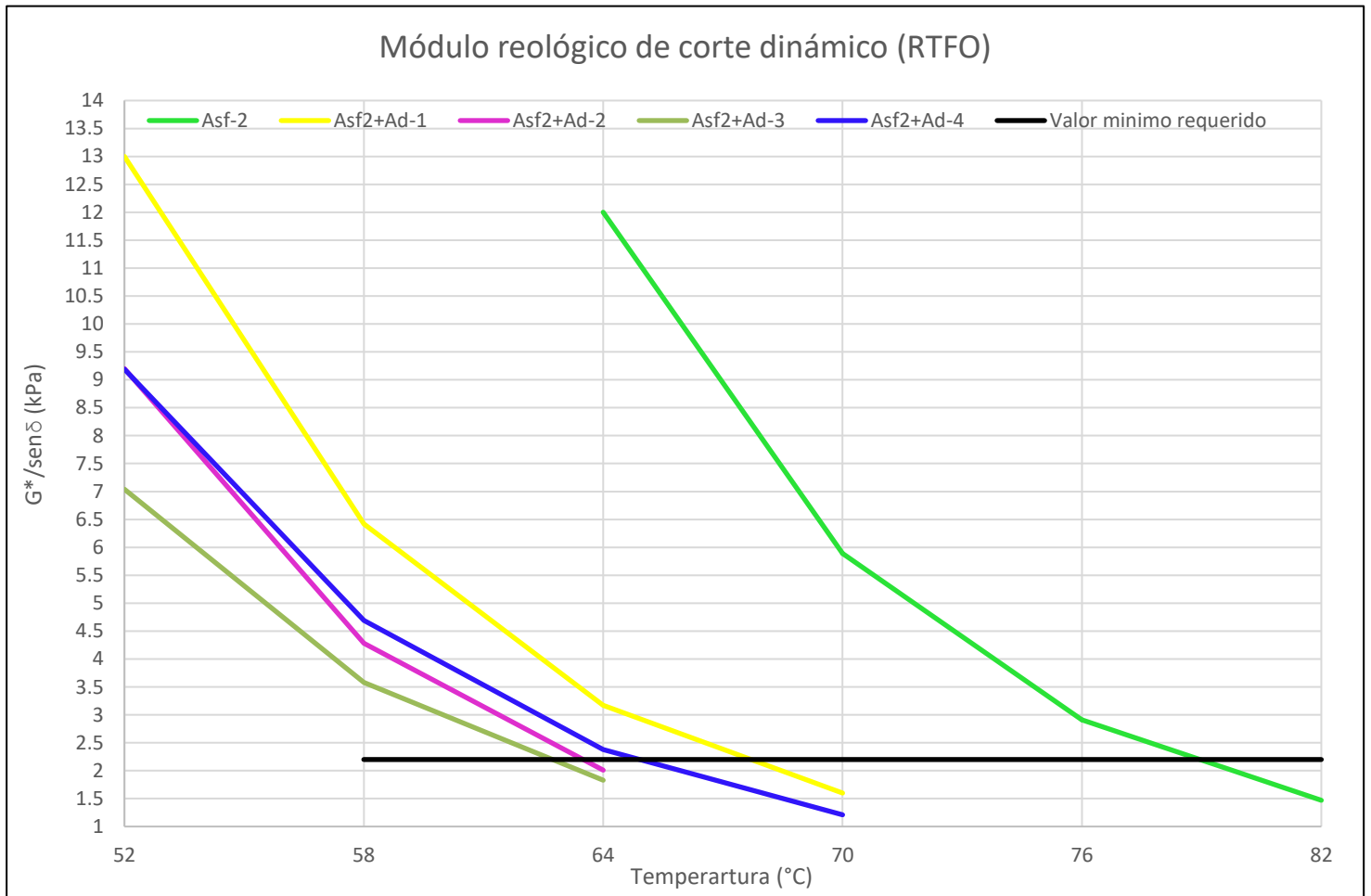
Después de someter las mezclas de asfalto base con la dosis óptima del aditivo rejuvenecedor al envejecimiento acelerado en el horno RTFO, los ligantes fueron evaluados mediante el DSR para determinar los valores de módulo de corte ( $G^*$ ), ángulo de fase ( $\delta$ ) y el parámetro de rigidez  $G^*/\text{sen}(\delta)$ . Este análisis permitió observar cómo se modificaban las propiedades reológicas del asfalto tras el envejecimiento, identificando la capacidad del aditivo para conservar la flexibilidad y resistencia del ligante frente al endurecimiento térmico y oxidativo. Los resultados obtenidos en la

Tabla 16 reflejan la efectividad del rejuvenecedor en la preservación del comportamiento del asfalto durante las primeras etapas de vida del pavimento, proporcionando información clave para determinar su desempeño a largo plazo.

**Tabla 16. Resultados modulo reológico de corte dinámico (RTFO).**

<b>Aditivo</b>	<b>% Aditivo</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (kPa)</b>	<b>δ (°)</b>	<b>G*/senδ (kPa)</b>
Asf-2	0%	64	11.1	67	12
		70	5.55	70.5	5.89
		76	2.8	74	2.91
		82	1.43	77.3	1.47
Asf-2+Ad-1	10	52	12	66.7	13
		<b>58</b>	<b>6.04</b>	<b>70.2</b>	<b>6.42</b>
		64	3.05	73.8	3.17
		70	1.56	77.2	1.6
Asf-2+Ad-2	5.5	52	8.77	72.4	9.2
		<b>58</b>	<b>4.15</b>	<b>75.7</b>	<b>4.28</b>
		64	1.97	78.9	2.01
Asf-2+Ad-3	6.8	52	6.69	71.8	7.04
		<b>58</b>	<b>3.46</b>	<b>74.7</b>	<b>3.58</b>
		64	1.79	77.6	1.83
Asf-2+Ad-4	6.5	52	8.48	67.3	9.19
		<b>58</b>	<b>4.42</b>	<b>70.6</b>	<b>4.69</b>
		64	2.29	73.9	2.38
		70	1.18	77.1	1.21

Fuente: Elaboración propia



**Figura 27. Comparación del  $G^*/\text{sen}\delta$  con los 4 aditivos (RTFO).**

Fuente: Elaboración propia

#### **6.1.10.4 Prueba de MSCR ASTM D 7405-24 (condición RTFO)**

Una vez envejecido el asfalto base con la dosis óptima del aditivo rejuvenecedor en el horno RTFO, se llevó a cabo la prueba de MSCR, el ensayo se realizó en el DSR con el objetivo de evaluar cómo el envejecimiento afectó el comportamiento viscoelástico del ligante, específicamente su resistencia a la deformación permanente y su capacidad de recuperación elástica ante cargas repetidas.

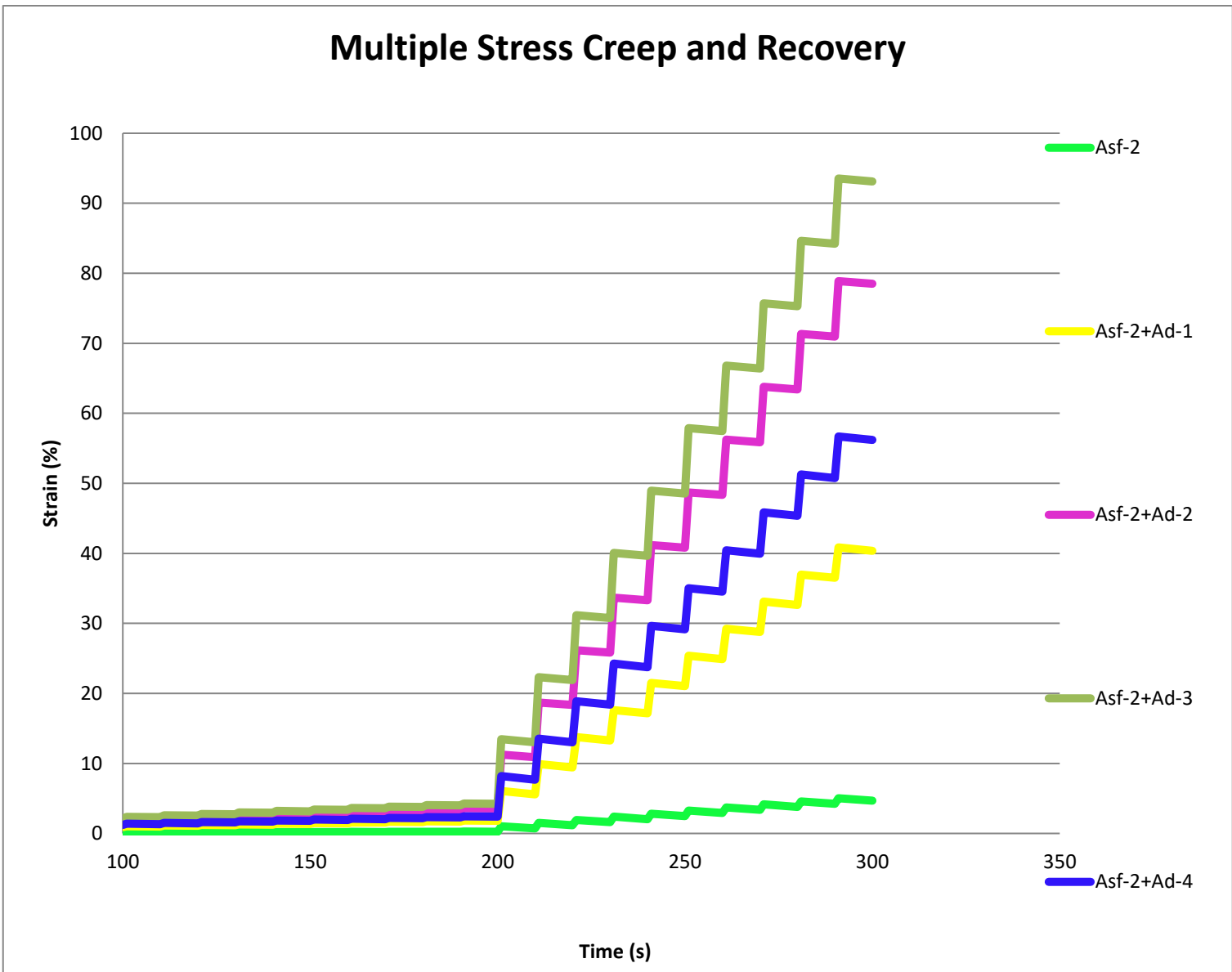
A partir de los parámetros obtenidos, deformación no recuperable ( $J_{nr}$ ) y respuesta elástica (RE%) mostrados en la Tabla 17, fue posible determinar la efectividad del

aditivo en conservar las propiedades reológicas del asfalto tras el envejecimiento lo cual mantuvo un comportamiento adecuado frente a esfuerzos de carga y temperatura, lo que confirmó la capacidad del rejuvenecedor para preservar el desempeño del ligante durante las primeras etapas de vida del pavimento.

**Tabla 17. Resultados MSCR con aditivo (RTFO).**

<b>Aditivo</b>	<b>% Aditivo</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>jnr a 3.2 kPa</b>	<b>Respuesta elástica a 3.2 kPa</b>
Asf-2	0%	58	0.139	43.08
Asf-2+Ad-1	10	58	1.21	10.86
Asf-2+Ad-2	5.5	58	2.34	4.56
Asf-2+Ad-3	6.8	58	2.78	4.41
Asf-2+Ad-4	6.5	58	1.68	8.61

Fuente: Elaboración propia



**Figura 28. MSCR con aditivos (RTFO).**

Fuente: Elaboración propia

### **6.1.11 Elaboración de mezclas**

Las mezclas se elaboraron a partir de la incorporación del aditivo rejuvenecedor al asfalto de aporte, empleando la dosis óptima determinada previamente mediante las evaluaciones reológicas realizadas en el DSR. Dicha dosificación se estableció con el propósito de reducir el grado de desempeño del asfalto base y obtener un ligante con características adecuadas para su posterior combinación con el asfalto envejecido extraído del RAP.

Una vez definida la dosis óptima de cada aditivo, se prepararon mezclas compuestas por 70 % de asfalto de aporte modificado con el aditivo rejuvenecedor y 30 % de asfalto extraído del RAP. Esta proporción se seleccionó con el objetivo de obtener un ligante final con grado de desempeño PG 70. Posteriormente, la mezcla final fue evaluada mediante ensayos reológicos en el DSR, así como mediante el ensayo de recuperación elástica por creep repetido, MSCR, con el fin de analizar su comportamiento y verificar su desempeño frente a las sollicitaciones aplicadas. Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 18, evidenciaron que la dosificación y la proporción de mezcla empleadas permitieron mejorar las propiedades reológicas del asfalto envejecido del RAP, validando la eficacia de los aditivos rejuvenecedores para restablecer el desempeño esperado del ligante.

**Tabla 18. Resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  de mezclas de Asf-1, Asf-2 y aditivos.**

Aditivo	% Aditivo	Temp. (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)
70% Asfalto base + 30 % RAP	0%	58	17.9	69.9	19
		64	8.97	72.8	9.39
		<b>70</b>	<b>4.51</b>	<b>75.9</b>	<b>4.65</b>
		76	2.28	78.7	2.33
		82	1.17	81.3	1.18
		88	0.615	83.5	0.619
M-Asf-1+Asf-2+Ad-1	10	58	5.74	75.3	5.93
		64	2.85	78.4	2.91
		<b>70</b>	<b>1.43</b>	<b>81.1</b>	<b>1.45</b>
		76	0.738	83.4	0.743
M-Asf-1+Asf-2+Ad-2	5.5	58	6.02	76.1	6.2
		64	2.95	79	3.01
		<b>70</b>	<b>1.48</b>	<b>81.6</b>	<b>1.49</b>
		76	0.757	83.8	0.761
M-Asf-1+Asf-2+Ad-3	6.8	58	6.31	74.8	6.54
		64	3.04	77.9	3.11
		<b>70</b>	<b>1.48</b>	<b>80.8</b>	<b>1.5</b>
		76	0.749	83.2	0.755
M-Asf-1+Asf-2+Ad-4	6.5	58	5.69	73.6	5.94
		64	2.85	76.8	2.92
		<b>70</b>	<b>1.43</b>	<b>79.7</b>	<b>1.46</b>
		76	0.737	82.2	0.744

Fuente: Elaboración propia

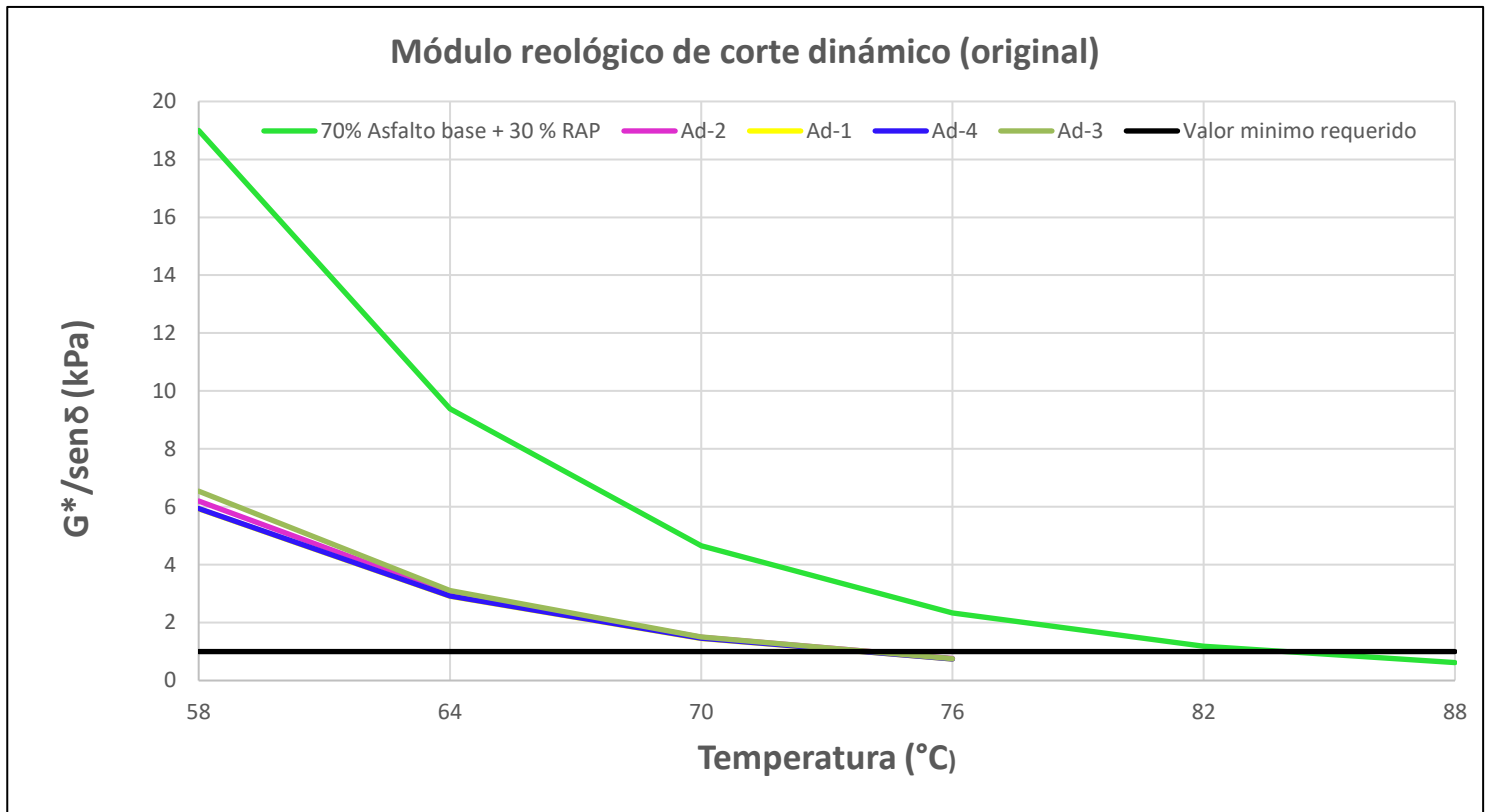


Figura 29. Comparación de las mezclas de  $G^*/\text{sen}\delta$ .

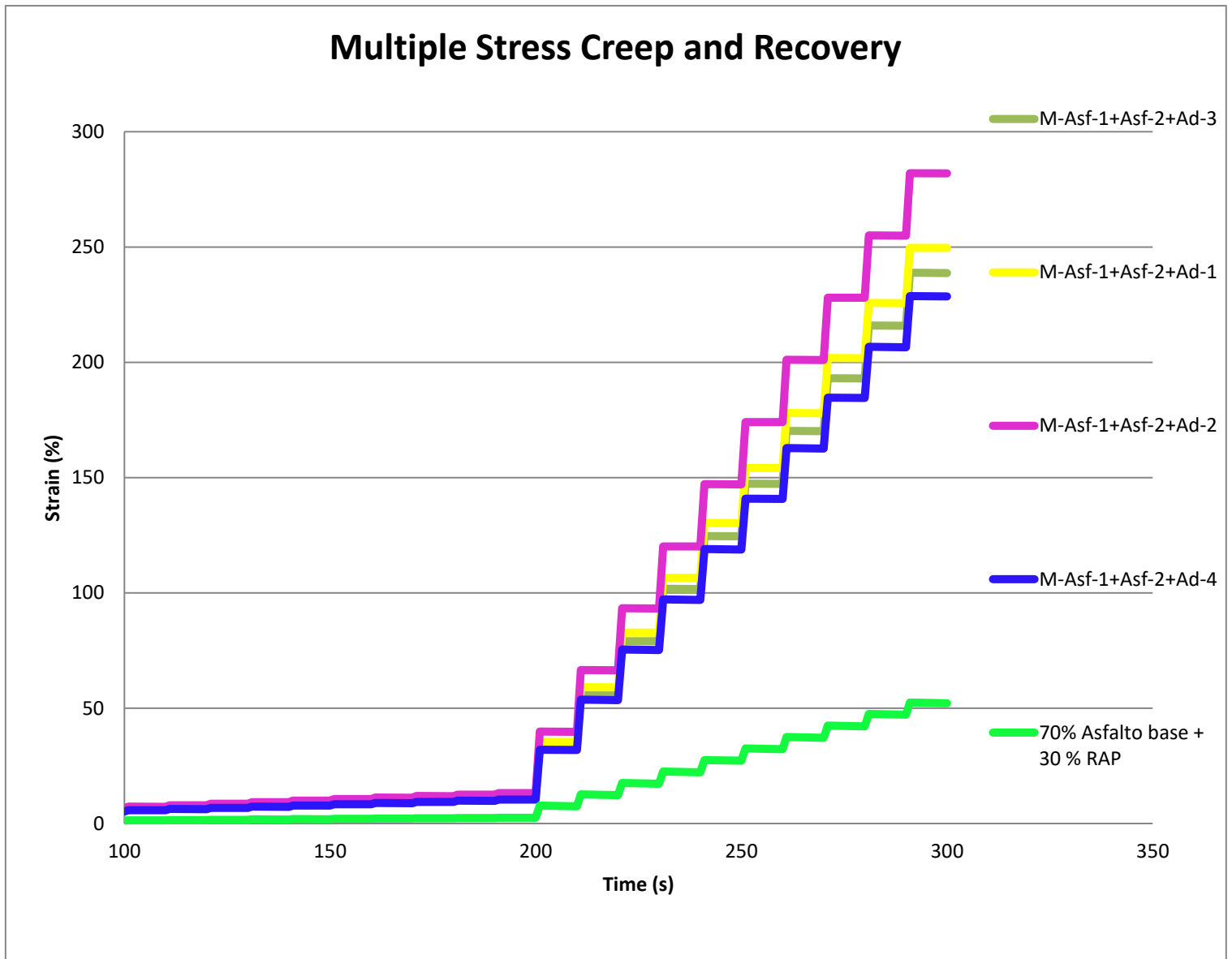
Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resultados de ensaye MSCR de mezclas de Asf-1, Asf-2 y aditivos

Aditivo	% Aditivo	Temp. (°C)	jnr a 3.2 kPa	Respuesta elástica a 3.2 kPa
70% Asfalto base + 30% RAP	0%	70	6.33	1.55
M-Asf-1+Asf-2+Ad-1	10	70	0.29	7.43
M-Asf-1+Asf-2+Ad-2	5.5	70	0.23	8.4
M-Asf-1+Asf-2+Ad-3	6.8	70	0.45	7.11

M-Asf-1+Asf-2+Ad-4	6.5	70	0.71	6.82
--------------------	-----	----	------	------

Fuente: Elaboración propia



**Figura 30. Comparación del MSCR (mezclas).**

Fuente: Elaboración propia

## 6 DISCUSIÓN

Durante el estudio, el RAP fue recolectado de una sola fuente de almacenamiento. Posteriormente, se realizó la extracción del ligante asfáltico mediante el equipo Rotarex y su recuperación en el Rotavapor. Con el ligante recuperado se determinó su grado de desempeño PG mediante el DSR, a partir del cálculo de sus temperaturas críticas.

El ligante asfáltico extraído del RAP presentó un grado de desempeño PG 100.6-21, lo que evidencia un alto nivel de envejecimiento y rigidez. Esta condición limita su capacidad de deformación y flexibilidad, por lo que fue necesario restaurar sus propiedades para lograr un desempeño adecuado en la mezcla asfáltica. Con base en las temperaturas críticas obtenidas, se determinó que el ligante base requerido para su restauración debía corresponder a un PG 56.8-12.5, con el propósito de equilibrar el comportamiento del material y alcanzar, después de la incorporación del RAP y los aditivos, un asfalto objetivo PG 70-16.

Para ello, se modificó un asfalto base PG 70-16 con cuatro aditivos rejuvenecedores: Ad-1, Ad-2, Ad-3 y Ad-4. El objetivo inicial fue reducir el grado de desempeño del asfalto base de 70 °C a un PG cercano a 58 °C, equivalente al grado determinado mediante el cálculo de temperaturas críticas.

La dosificación óptima de cada aditivo se estableció mediante una serie de ensayos reológicos en el DSR, evaluando diferentes porcentajes de aditivo rejuvenecedor hasta cumplir con el requisito establecido en la normativa N° CMT-4-05-004/25 para el módulo reológico de corte dinámico, expresado como  $G^*/\sin \delta$ , cuyo valor mínimo es de 1 kPa. Los resultados permitieron identificar los porcentajes óptimos de aditivo respecto a una masa conocida de asfalto base. Para el aditivo Ad-1, el porcentaje óptimo fue de 10 %; para Iterlene Ad-2, de 5.5 %; para Ad-3, de 6.8 %; y para Ad-4, de 6.5 %. Con estas dosificaciones se logró reducir el grado de desempeño del asfalto base hacia el valor objetivo.

Una vez definidos los porcentajes óptimos de cada aditivo rejuvenecedor, se elaboraron mezclas compuestas por 70 % de asfalto base modificado y 30 % de ligante asfáltico extraído del RAP, lo cual constituyó el objetivo principal de esta investigación. Esta combinación tuvo como propósito evaluar la capacidad de los aditivos para restaurar las

propiedades del ligante envejecido y obtener un ligante final con grado de desempeño PG 70-16.

Para verificar el cumplimiento del grado PG objetivo, las mezclas fueron evaluadas a 70 °C mediante el DSR, considerando el requisito establecido en la normativa N·CMT·4·05·004/25 para el módulo reológico de corte dinámico, expresado como  $G^*/\text{sen } \delta$ , cuyo valor mínimo debe ser de 1 kPa.

Los resultados obtenidos mostraron que todas las mezclas cumplieron con dicho requisito. Para el aditivo Ad-1, el valor de  $G^*/\text{sen } \delta$  fue de 1.45 kPa; para Ad-2, de 1.49 kPa; para Ad-3, de 1.50 kPa; y para Ad-4, de 1.45 kPa.

Estos resultados indican que la combinación óptima entre el asfalto base modificado con aditivo rejuvenecedor y el ligante extraído del RAP permitió alcanzar satisfactoriamente un grado de desempeño PG 70. Asimismo, se confirma que los cuatro aditivos evaluados contribuyeron a la restauración del ligante envejecido, permitiendo cumplir con el parámetro reológico exigido por la normativa a la temperatura de 70 °C.

Después del envejecimiento a corto plazo en el horno RTFO, todas las muestras modificadas con aditivos presentaron una mayor pérdida de masa en comparación con el asfalto base Asf-2 (-0.444 %). La mayor pérdida se observó con el aditivo Ad-4, con un valor de -1.382 %, seguido de Ad-1 (-1.284 %). Por su parte, Ad-2 presentó una pérdida de -1.193 %, mientras que Ad-3 registró la menor pérdida entre los aditivos, con -0.999 %.

Esta disminución de masa puede atribuirse principalmente a la evaporación de componentes volátiles durante el calentamiento y la exposición al aire en el ensayo RTFO. Por ello, los aditivos que presentaron mayores pérdidas podrían contener fracciones más livianas o componentes con menor estabilidad térmica.

,una vez envejecido el asfalto se analizaron sus propiedades reológicas en el DSR, y Ad-2 y Ad-3 mantuvieron los valores más estables de  $G^*/\text{sen } \delta$  (4.28 kPa y 3.58 kPa), mientras que Ad-1 y Ad-4 alcanzaron valores superiores (6.42 kPa y 4.69 kPa), indicando una mayor rigidez, esto debido a que tuvieron una mayor pérdida de cambio de masa.

En la prueba MSCR, los ligantes rejuvenecidos con Iterlene Ad-2 y Ad- 3 mostraron un

equilibrio entre deformación no recuperable ( $J_{nr}$ ) de 2.34 kPa y 2.78 kPa, con recuperación elástica de 4.56 kPa y 4.41 kPa, reflejando una adecuada resistencia a la deformación permanente y mejor capacidad viscoelástica frente a cargas repetidas.

En conjunto, los resultados evidencian que los aditivos Ad-2 y Ad-3 fueron los más eficientes para restaurar las propiedades reológicas del asfalto envejecido, reduciendo su rigidez más de un 50 %, manteniendo estabilidad térmica y permitiendo recuperar un grado PG equivalente al de un ligante virgen. Su aplicación representa una alternativa técnica viable y sustentable para aumentar el uso de RAP en mezclas asfálticas, contribuyendo a la conservación de recursos. La metodología seguida garantiza un proceso replicable y confiable para la caracterización y restauración de ligantes asfálticos envejecidos.

## 7 CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que la incorporación de aditivos rejuvenecedores permitió modificar favorablemente el comportamiento reológico del asfalto base PG 70-16 y del ligante asfáltico extraído del RAP, contribuyendo a la recuperación de sus propiedades físicas y mecánicas.

La determinación de la dosis óptima de cada aditivo se realizó a partir del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , evaluado mediante el DSR. Los resultados permitieron establecer como dosificaciones óptimas 10 % para KA-918R, 5.5 % para Iterlene ACF-2000 Green, 6.8 % para Evoflex CA-9 y 6.5 % para Danox RAP. Con estas dosificaciones, los asfaltos modificados alcanzaron valores cercanos al límite mínimo de 1 kPa a la temperatura de 58 °C, lo que permitió ajustar el comportamiento del asfalto base hacia el grado requerido para su posterior combinación con el ligante envejecido del RAP.

Posteriormente, al mezclar 70 % de asfalto base modificado con 30 % de ligante asfáltico extraído del RAP, todas las formulaciones cumplieron con el requisito mínimo de  $G^*/\text{sen}\delta$  de 1 kPa a 70 °C establecido por la normativa N·CMT·4·05·004/25. Los valores obtenidos fueron 1.45 kPa para la mezcla con KA-918R, 1.49 kPa para la mezcla con Iterlene ACF-2000 Green, 1.50 kPa para la mezcla con Evoflex CA-9 y 1.46 kPa para la mezcla con Danox RAP. Estos resultados confirman que las cuatro combinaciones lograron alcanzar el grado de desempeño objetivo PG 70.

Asimismo, los resultados evidencian que los aditivos rejuvenecedores contribuyeron a reducir la rigidez del ligante envejecido del RAP, cuyo comportamiento inicial reflejaba un alto grado de envejecimiento. Entre los aditivos evaluados, Iterlene ACF-2000 Green y Evoflex CA-9 presentaron el mejor desempeño global, al requerir menores porcentajes de dosificación y mantener valores adecuados de  $G^*/\text{sen}\delta$  en la mezcla final, lo que indica una respuesta reológica más equilibrada.

Por lo tanto, se concluye que la modificación del ligante asfáltico mediante aditivos rejuvenecedores representa una alternativa técnica viable para recuperar propiedades físicas y mecánicas del ligante envejecido del RAP, sin comprometer el desempeño del ligante final. En particular, Iterlene ACF-2000 Green y Evoflex CA-9 se identifican como los aditivos con mejor potencial para su incorporación en mezclas asfálticas con RAP.

## 8 Líneas futuras

- Diseñar mezclas asfálticas con 30 % de RAP empleando los aditivos rejuvenecedores que presentaron el mejor desempeño, una vez definido su porcentaje óptimo de incorporación.
- Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas mediante ensayos de desempeño, tales como resistencia a la deformación permanente, fatiga y susceptibilidad al daño por humedad.
- Elaborar curvas maestras del ligante y de la mezcla asfáltica, con el fin de ampliar la comprensión de su comportamiento viscoelástico en diferentes condiciones de temperatura y frecuencia de carga.
- Analizar el parámetro de Glover-Rowe como herramienta complementaria para evaluar el nivel de envejecimiento y la capacidad de restauración del ligante asfáltico tratado con aditivos rejuvenecedores.
- Evaluar las propiedades físicas de los aditivos rejuvenecedores, tales como densidad, viscosidad, contenido de humedad y volatilidad, con el fin de caracterizar su comportamiento y su posible influencia en la elaboración de mezclas asfálticas.

- Analizar las propiedades químicas de los aditivos mediante técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), cromatografía u otros métodos de caracterización, a fin de identificar su composición y su interacción con el ligante asfáltico envejecido.

## 9 LITERATURA CITADA

Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). *Reclaimed asphalt pavement—A literature review* (FHWA-ICT-07-001). <https://www.ideals.illinois.edu/items/46016>

Arámbula-Mercado, E., Kaseer, F., Martin, A. E., Yin, F., & Garcia Cucalon, L. (2018). Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and Building Materials*, 158, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024>

ASTM International. (2016). *ASTM D6648: Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)*. ASTM International.

ASTM International. (2022a). *ASTM D2872: Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test)*. ASTM International.

ASTM International. (2022b). *ASTM D6521: Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)*. ASTM International.

ASTM International. (2023). *ASTM D7175: Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer*. ASTM International.

ASTM International. (2024a). *ASTM D2172: Standard test methods for quantitative extraction of asphalt binder from asphalt mixtures*. ASTM International.

ASTM International. (2024b). *ASTM D5404: Standard practice for recovery of asphalt from solution using the rotary evaporator*. ASTM International.

ASTM International. (2024c). *ASTM D7405: Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer*. ASTM International.

Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>

Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Memon, Z. A., Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., & Milad, A. (2021). Mechanical performance of reclaimed asphalt pavement modified with waste frying oil and crumb rubber. *Materials*, 14(11), 2781. <https://doi.org/10.3390/ma14112781>

Chen, J., Chen, S., Liao, M., & Huang, S. (2015). Laboratory evaluation of asphalt blends of recycling agents mixed with aged binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04014143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001081)

Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice* (FHWA-HRT-11-021). Federal Highway Administration. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1104401>

Copeland, A. (2012). *Recycling and warm mix asphalt: The trends economic drivers*. National Asphalt Pavement Association. [https://connect.ncdot.gov/projects/construction/Structural%20Design%20AGCDOT%20Joint%20Bridge%20Design%20Commi/Recycling%20and%20Warm%20Mix%20Asphalt\\_Trends.pdf](https://connect.ncdot.gov/projects/construction/Structural%20Design%20AGCDOT%20Joint%20Bridge%20Design%20Commi/Recycling%20and%20Warm%20Mix%20Asphalt_Trends.pdf)

Devulapalli, L., Kothandaraman, S., & Sarang, G. (2020). Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP. *Construction and Building*

*Materials*, 254, 119298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119298>

Fang, Y., Zhang, Z., Yang, J., & Li, X. (2022). Performance characterization of biorecycled asphalt and gray correlation analysis between its components and macroproperties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), 04021490. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004127)

Farooq, M. A., Mir, M. S., & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.079>

Grilli, A., Gnisci, M. I., & Bocci, M. (2017). Effect of ageing process on bitumen and rejuvenated bitumen. *Construction and Building Materials*, 136, 474–481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.027>

Haghshenas, H. F., Andriescu, A., Dongre, R., Veginati, V., Mensching, D., & Youtcheff, J. (2024). Evaluation of rheological and failure-based recycling agent optimization methods. *Transportation Research Record*, 2678(9), 683–698. <https://doi.org/10.1177/03611981241230531>

Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Kandiah, P. (2010). Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in airfield HMA pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 136(3), 181–189.

Heneash, U. (2013). *Effect of the repeated recycling on hot mix asphalt properties* [Tesis doctoral, University of Nottingham]. <http://eprints.nottingham.ac.uk/13283/>

Hossain, Z., Roy, S., & Rashid, F. (2020). Microscopic examination of rejuvenated binders with high reclaimed asphalts. *Construction and Building Materials*, 257, 119490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119490>

Im, S., Karki, P., & Zhou, F. (2016). Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 115,

727–734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.081>

Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S., & Sun, L. (2017). Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), D4016003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769)

Kuang, D., Jiao, Y., Ye, Z., Lu, Z., Chen, H., Yu, J., & Liu, N. (2018). Diffusibility enhancement of rejuvenator by epoxidized soybean oil and its influence on the performance of recycled hot mix asphalt mixtures. *Materials*, 11(5), 833. <https://doi.org/10.3390/ma11050833>

Lee, S., Kwak, D., & Le, T. (2023). Laboratory evaluation on the aging susceptibility of reclaimed asphalt bitumen containing low-viscosity binder and cooking oil waste. *Results in Engineering*, 19, 101260. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101260>

Li, X., Mihai, O., Christopher, W., & Timothy, R. (2008). Effect of reclaimed asphalt pavement proportion and type, and binder grade on asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2051(1), 90–97. <https://doi.org/10.3141/2051-11>

Limeta Dionet, E. J., Delgado Alamilla, H., & Solorio Murillo, J. R. (2023). *Desempeño mecánico de mezclas asfálticas con bajos contenidos de RAP* (Publicación técnica No. 900). Instituto Mexicano del Transporte.

Mogawer, W. S., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 183–208. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>

Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., & Austerman, A. J. (2013). Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836>

Monroy Linarez, M., León Gallego, J. F., & Ramos Cárdenas, M. A. (2020). *Monografía del uso de RAP (pavimentos asfáltico reciclados) para la rehabilitación de vías urbanas del municipio de Girardot-Cundinamarca* [Tesis doctoral, Corporación Universitaria Minuto de Dios].

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2020). *Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25749>

Newcomb, D. E., Brown, E. R., & Epps, J. A. (2007). *Designing HMA mixtures with high RAP content: A practical guide*. National Asphalt Pavement Association.

Ongel, A., & Hugener, M. (2015). Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 94, 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.030>

Pan, P., Kuang, Y., Hu, X., & Zhang, X. (2018). A comprehensive evaluation of rejuvenator on mechanical properties, durability, and dynamic characteristics of artificially aged asphalt mixture. *Materials*, 11(9), 1554. <https://doi.org/10.3390/ma11091554>

Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6), 1022–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.12.007>

Shen, J., Amirkhanian, S., & Tang, B. (2007). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures. *Construction and Building Materials*, 21(5), 958–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.03.006>

Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building*

*Materials*, 192, 593–609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169>

Torres, H. P., Fernandes, S. R. M., Loureiro, C. D. A., Moura, C. F. N., Silva, H. M. R. D., & Oliveira, J. R. M. (2020). Use of polymer modified binders as rejuvenators in recycled asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(6), 654–664. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6006-5>

Tran, N. H., Taylor, A., & Willis, J. R. (2012). *Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents* (NCAT Report No. 12-05). National Center for Asphalt Technology, Auburn University. <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/reports/2012/rep12-05.pdf>

Veeraragavan, R. K. (2016). *An investigation of the performance of hot mix asphalt (HMA) binder course materials with high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) and rejuvenators* [Tesis, Worcester Polytechnic Institute].

Veeraragavan, R., Mallick, R., Tao, M., Zaumanis, M., Frank, R., & Bradbury, R. (2017). Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix. *Transportation Research Record*, 2633(1), 69–79. <https://doi.org/10.3141/2633-09>

Walther, A., Büchler, S., Falchetto, A., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. (2019). Experimental investigation on asphalt mixtures prepared with reclaimed asphalt pavement and rejuvenators based on the BTSV method. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1695–1708. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1594053>

Yalçın, E. (2021). Investigation of physical, chemical and rheological properties of bituminous binders modified with different rejuvenators. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(1), 497–510. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.832495>

Young, T. (1996). *Recycling hot-mix asphalt pavements* (IS 123s). National Asphalt Pavement Association.

Yu, X., Zaumanis, M., Dos Santos, S., & Poulikakos, L. D. (2014). Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>

Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Giustozzi, F. (2021). Recycling asphalt using waste bio-oil: A review of the production processes, properties and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1135–1159. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.032>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record*, 2370(1), 17–25. <https://doi.org/10.3141/2370-03>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014a). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014b). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt. *Materials and Structures*, 48, 2475–2488. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>

Zhang, H., Chen, Z., Xu, G., & Shi, C. (2018). Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices. *Fuel*, 221, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.087>

## 10 APENDICE 1

En este apéndice se presenta la descripción del procedimiento empleado para la elaboración de las mezclas del asfalto Asf-1, o asfalto de aporte, con los diferentes aditivos utilizados en la investigación. El propósito de este apartado es detallar de manera puntual cómo se llevó a cabo este proceso, a fin de aportar mayor claridad sobre su ejecución y servir como referencia para la comprensión del trabajo experimental realizado.

Con el fin de determinar el porcentaje óptimo de aditivo rejuvenecedor en el asfalto base Asf-2, se elaboraron inicialmente varias mezclas con cada uno de los aditivos, utilizando diferentes porcentajes de incorporación en relación con la masa del asfalto. El objetivo de este procedimiento fue establecer la dosificación más adecuada para disminuir el grado de desempeño del asfalto de PG 70-16 a PG 52-12.2. Una vez preparadas las mezclas, se obtuvieron las muestras requeridas para su posterior evaluación en el reómetro de corte dinámico.

Para determinar la masa de aditivo rejuvenecedor con respecto a la masa de asfalto, se tomaron 50 g de asfalto y se calculó el 1 % de aditivo rejuvenecedor correspondiente al porcentaje inicial de aditivo a incorporar. Esta proporción se utilizó para evaluar si era posible reducir el grado del asfalto y satisfacer la condición de  $G^*/\text{sen}\delta \geq 1$  kPa. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 19, la incorporación del 1 % de aditivo produjo un valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  de 4.05 kPa, evidenciando que esta dosificación no permitía alcanzar la reducción deseada en el grado del asfalto. Por lo tanto, fue necesario incrementar el porcentaje de aditivo y realizar nuevas evaluaciones. En este sentido, se elaboró una mezcla con 10 % de aditivo rejuvenecedor, con la cual sí se satisficó el criterio establecido, logrando reducir el grado del asfalto de PG 64 a PG 58 y manteniendo el cumplimiento del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta \geq 1$  kPa. Si bien el objetivo inicial era disminuir el grado PG de

64 a 52.2, se decidió emplear como referencia el grado PG 58, debido a que este sí se encuentra disponible comercialmente, mientras que el PG 52 no está disponible en el mercado. Por ello, el análisis se desarrolló con base en este grado para todos los tipos de aditivos.

**Tabla 22. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo.**

Aditivo	Aditivo %	Temp. (°C)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
KA-918-R	1	58	4.81	76.2	4.95
Ad-1	10		1.03	82.7	1.04

Fuente:Elaboración propia

En la Figura 35 se presenta el proceso de incorporación del aditivo rejuvenecedor Ad-1 en una muestra de asfalto tipo PG 64-16. Inicialmente, la muestra fue calentada a una temperatura de 150 °C. Al alcanzar dicha temperatura, se adicionó lentamente el aditivo rejuvenecedor sobre una masa conocida de asfalto. Finalmente, se efectuó una agitación manual para favorecer la dispersión uniforme y completa del aditivo con el cemento asfáltico.



**Figura 38. Adición de aditivo KA-918R (Ad-1).**

Fuente: Elaboración propia

En el caso del aditivo Ad-2, se aplicó el mismo procedimiento descrito previamente.

Para ello, fue necesario elaborar tres mezclas con porcentajes de 5 %, 5.5 % y 6.14 %. Conforme a los resultados mostrados en la Tabla 20, se determinó que la dosificación de 5.5 % fue la que permitió satisfacer el criterio de cumplimiento establecido.

**Tabla 23. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo.**

Aditivo	Aditivo %	Temp. (°C)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
Iterlene ACF 2000 Green Ad-2	5	58	1.21	83.2	1.22
	<b>5.5</b>		<b>1.04</b>	<b>83.7</b>	<b>1.05</b>
	6.14		0.88	84.2	0.884

Fuente:Elaboración propia



**Figura 39. Adición de aditivo Iterlene ACF 2000 Green (Ad-2).**

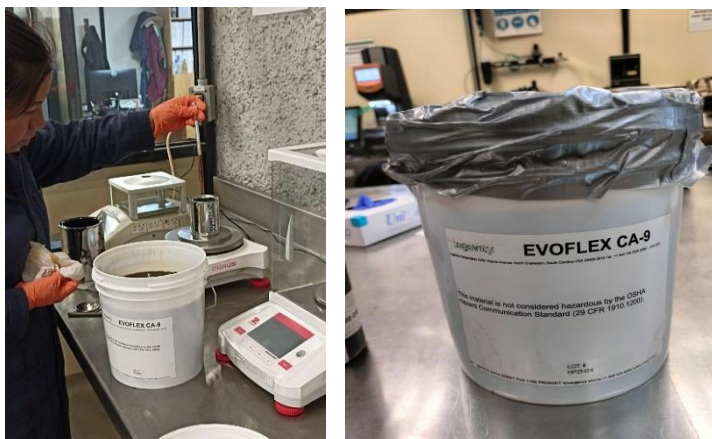
Fuente: Elaboración propia

Para el aditivo Ad-3, se evaluaron mezclas con contenidos de 6.5 %, 6.8 % y 7 %, siguiendo la misma metodología de análisis empleada en los casos anteriores. A partir de los resultados mostrados en la Tabla 21, se identificó que la dosificación de 6.8 % fue la más adecuada, ya que permitió cumplir con el criterio establecido.

**Tabla 24. Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo.**

Aditivo	Aditivo %	Temp. (°C)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
Evoflex CA-9 Ad-3	6.5	58	1.21	82.4	1.22
	<b>6.8</b>		<b>0.973</b>	<b>83.3</b>	<b>0.98</b>
	7		0.907	83.4	0.913

Fuente:Elaboración propia



**Figura 40. Adición de aditivo Evoflex CA-9 (Ad-3).**

Fuente: Elaboración propia

En el caso del aditivo Ad-4, se prepararon mezclas con dosificaciones de 5 %, 5.2 %, 6 % y 6.5 %, a fin de establecer el porcentaje más apropiado para el cumplimiento del criterio definido. Según los resultados mostrados en la Tabla 22, la dosificación de 6.5 % fue la que permitió cumplir satisfactoriamente con dicho requerimiento.

**Tabla 25.Mezclas de Asf-2 con diferentes porcentajes de aditivo.**

Aditivo	Aditivo %	Temp. (°C)	G* (kPa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
Danox RAP Ad-4	5	58	1.7	79.8	1.72
	5.2		1.3	80.7	1.32
	6		1.23	80.8	1.25
	<b>6.5</b>		<b>1.1</b>	<b>81.2</b>	<b>1.12</b>

Fuente:Elaboración propia

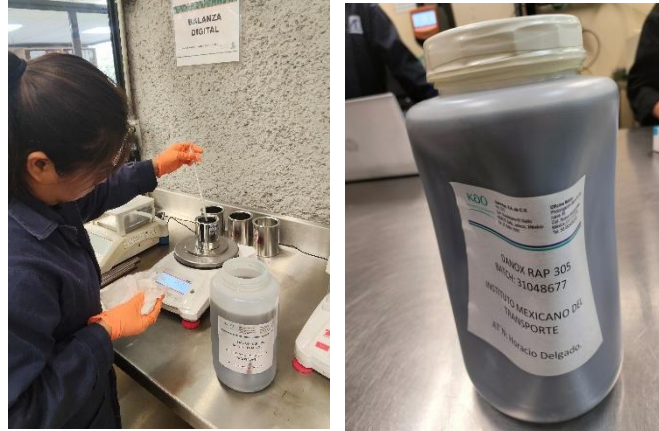


Figura 41. Adición de aditivo Danox RAP 305 (Ad-4).

Fuente: Elaboración propia

## 11 APENDICE 2

Tabla 26. Composición química de los aditivos rejuvenecedores.

Aditivo	Fabricante / Origen	Base química (según info disponible)	Función principal	Enfoque sostenible	Diferencias clave
(Ad-1)	(Proveedor no especificado)	No publicada (prob. ésteres o aminas modificadas)	Rejuvenecer ligante envejecido, mejorar ductilidad	No detallado	Información técnica reservada; poca transparencia en composición
(Ad-2)	Itechimica (Italia)	Compuestos orgánicos + antioxidantes	Restaurar ligante envejecido en caliente	✓ Enfatiza bajo impacto ambiental	Comercializado como “verde”; pensado para altas tasas de RAP
(Ad-3)	Ingevity (EE. UU.)	Aditivos orgánicos modificadores	Mejorar mezclas con alto RAP, restaurar	✓ Promueve mayor	Parte de la línea Evoflex; destaca

			propiedades del betún	reciclaje de RAP	en compatibilidad con mezclas RAP
(Ad-4)	Kao Chemicals (España)	Derivado de aminas grasas (naturales/sintéticas)	Rejuvenecer y flexibilizar ligante, mejorar adhesión	✓ Derivado de materias grasas, permite más RAP	Único con ficha TDS publicada; valores químicos medibles (aminas, acidez, humedad)

Fuente: Elaboración propia