

Ing. Esbeydi Janet
Limeta Dionet

Evaluación del asfalto recuperado por los métodos de
destilación y rotavapor e impacto en el Grado de Desempeño

2021



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

EVALUACIÓN DEL ASFALTO RECUPERADO POR LOS
MÉTODOS DE DESTILACIÓN Y ROTAVAPOR E IMPACTO EN
EL GRADO DE DESEMPEÑO

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Esbeydi Janet Limeta Dionet

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Co-dirigido por:

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Querétaro, Qro. a 07 de junio de 2021



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

EVALUACIÓN DEL ASFALTO RECUPERADO POR LOS MÉTODOS DE
DESTILACIÓN Y ROTAVAPOR E IMPACTO EN EL GRADO DE DESEMPEÑO

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Esbeydi Janet Limeta Dionet

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Co-dirigido por:

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

Dr. Eduardo Rojas González

Suplente

Centro Universitario

Junio 2021

Querétaro, Qro.

RESUMEN

Los materiales presentes en los pavimentos recuperados pueden tener un valor monetario, incluso cuando los pavimentos han llegado al final de su vida útil. El interés en el uso del pavimento de asfalto reciclado (RAP), y el uso de las emulsiones, han ido ganando impulso en los últimos años debido a sus ventajas en la construcción de infraestructura de pavimentos en carreteras sostenibles.

Se sabe que el envejecimiento del asfalto se ve reflejado en la estructura del pavimento, por ello es fundamental reproducir el fenómeno de envejecimiento de campo en laboratorio, ya sea para reutilizar o evaluar. Para evaluar el asfalto se hace necesario recuperarlo tal como estaba antes de emulsificarlo y, en el caso del RAP, quitar el solvente del asfalto. Para ambos casos es fundamental seleccionar el método de recuperación que tenga la menor influencia posible en el comportamiento mecánico del asfalto; sin embargo, aún existen dudas sobre que método es mejor.

Para la extracción del solvente existen diferentes métodos, destacando la de destilación y la de evaporación; en ambos métodos existen incógnitas sobre la temperatura final que afecta al asfalto. Es importante que el residuo de asfalto sea recuperado con la menor cantidad de daños posibles para un análisis preciso del residuo.

Para esta investigación se considera hacer la evaluación reológica del asfalto recuperado de la emulsión y del RAP para conocer el impacto que tendrá el método de separación en el grado PG (*Performance Grade*).

Palabras clave: (Rotavapor, Alambique, Asfalto, Grado PG, Reciclado en caliente, Reciclado en frío:)

SUMMARY

The materials present in reclaimed pavements can have a monetary value, even when the pavements have reached the end of their useful life. Interest in the use of recycled asphalt pavement (RAP), and the use of emulsions, has been gaining momentum in recent years due to their advantages in the construction of sustainable highway pavement infrastructure.

It is known that asphalt aging is reflected in the pavement structure, so it is essential to reproduce the field aging phenomenon in the laboratory, either for reuse or evaluation. To evaluate the asphalt, it is necessary to recover it as it was before emulsification and, in the case of RAP, to remove the solvent from the asphalt. For both cases it is essential to select the recovery method that has the least possible influence on the mechanical behavior of the asphalt; however, there are still doubts as to which method is better.

For the extraction of the solvent there are different methods, the most important being distillation and evaporation; in both methods there are unknowns about the final temperature that affects the asphalt. It is important that the asphalt residue is recovered with the least amount of damage possible for an accurate analysis of the residue.

For this research, rheological evaluation of the asphalt recovered from the emulsion and the RAP is considered in order to know the impact that the separation method will have on the PG (Performance Grade).

(Keywords: Rotavapor, Alambique, Asphalt, Performance Grade, Hot Recycling, Cold Recycling:)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A mi familia, que en la distancia me apoyaron incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a esta etapa.

No existen palabras para agradecer a mi madre que a pesar de la distancia siempre me ha motivado, y ha estado presente con sus oraciones y palabras de aliento cuando más lo necesito, por el apoyo absoluto brindado en todo momento.

A mi padre, por el cariño y por ser pieza fundamental para culminar esta etapa.

Mis más profundos agradecimientos al Dr. Horacio Delgado Alamilla y a la M.I. Yelitza Ayala del Toro, por brindarme parte de sus conocimientos, por ser guía en la investigación, y el su apoyo incondicional para poder concluir la maestría. Así mismo agradezco al Técnico José de la Cruz Salas, por ayudarme en el proceso de la experimentación.

A Jacobo por el apoyo, la paciencia y por estar a mi lado en todo momento inclusive en los días turbulentos.

Al Dr. Paul Gárnica por el apoyo antes y durante la Estancia.

A mis familiares, especialmente a mis tías: Naty y Nelly, tíos: Erick, Demetrio y Tomás y abuelas: Paula y Alicia, por el apoyo moral y motivaciones.

A mis amigos y compañeros de clases, por todo el apoyo que me brindaron en esta etapa, principalmente a Mauren Ixchel y Anubis Alberto quienes estuvieron presente en todo momento.

También agradecer a mis profesores y directora de Tesis Dra. Teresa López por los conocimientos impartidos en clases y por la dedicación en cada una de ellas orientándome al desarrollo de la esta investigación.

Al ing. Moises Cruz, del grupo PACOVSA, por facilitármela mezcla de planta.

Al Instituto Mexicano del Transporte, por brindarme los equipos y herramientas necesarias para llevar a cabo la experimentación de la presente tesis.

Al Consejo Nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo de investigación

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tabla de contenido

1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	- 5 -
1.2	JUSTIFICACIÓN	- 5 -
1.3	HIPÓTESIS	- 6 -
1.4	OBJETIVO	- 6 -
2.	MARCO TEÓRICO	- 7 -
2.1	GENERALIDADES DEL PAVIMENTO.....	- 8 -
2.1.1	Asfalto	- 8 -
2.1.2	Reciclaje de pavimentos asfálticos.....	- 17 -
3.	METODOLOGÍA	- 33 -
3.1	RECICLADO EN CALIENTE.....	- 33 -
3.1.1	Calibración del proceso de extracción.....	- 35 -
3.1.2	Validación de las calibraciones con Mezcla asfáltica	- 40 -
3.2	RECICLADO EN FRÍO.....	- 43 -
3.2.1	Caracterización por Grado PG	- 43 -
3.2.2	Extracción en Rotavapor	- 43 -
3.2.3	Extracción en Alambique.....	- 44 -
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	- 46 -
4.1	CALIBRACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECUPERACIÓN	- 46 -
4.1.1	Caracterización por Grado PG	- 46 -
4.1.2	Extracción en rotavapor.....	- 47 -
4.1.2.1	Asfalto PG 64-22.....	- 47 -
4.1.3	Extracción en alambique	- 54 -
4.1.4	Discusión.....	- 59 -
4.2	MEZCLA ASFÁLTICA.....	- 61 -
4.2.1	Extracción en Rotavapor	- 61 -
4.2.2	Extracción en alambique	- 67 -
4.2.3	Discusión.....	- 71 -
4.3	EMULSIÓN ASFÁLTICA	- 73 -

4.3.1 Extracción en Rotavapor	- 73 -
4.3.2 Extracción en Alambique.....	- 74 -
4.3.3 Discusión.....	- 75 -
5. CONCLUSIONES	- 76 -
6. REFERENCIAS.....	- 77 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Nivel de ajuste	- 12 -
Tabla 2. 1. Resumen de los métodos de extracción.....	- 21 -
Tabla 2.2 Porcentaje de RAP.....	- 23 -
Tabla 2. 3 Temperatura critica	- 25 -
Tabla 3. 1 Nomenclatura de los asfaltos en los diferentes procesos de la primera etapa del estudio.....	- 34 -
Tabla 3. 2 Proceso de calibración con el Rotavapor	- 37 -
Tabla 3. 3. Proceso de extracción con el Alambique.....	- 39 -
Tabla 4. 1. Resultados del Grado PG de asfaltos bases	- 46 -
Tabla 4.2. PG 64-22-10 gramos – DSR Original-Rotavapor.....	- 48 -
Tabla 4.3. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 10 gramos – DSR Original - Rotavapor	- 49 -
Tabla 4.4. PG 64-22 a 30 gramos – DSR Original - Rotavapor	- 49 -
Tabla 4.5. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 30 gramos – DSR Original - Rotavapor	- 50 -
Tabla 4. 6 Variación entre muestras - B PG 64-22 – MSCR - Rotavapor	- 51 -
Tabla 4.7. PG 70-22- 10 y 30 gramos– DSR Original - Rotavapor	- 52 -
Tabla 4.8. Variación entre muestras - B PG 70-22 – DSR Original - Rotavapor.....	- 53 -

Tabla 4. 9. Variación entre muestras - B PG 70-22 – MSCR - Rotavapor	- 53 -
Tabla 4. 10. PG 64-22- 10 y 30 gramos– DSR Original-Alambique.....	- 55 -
Tabla 4. 11 Variación entre muestras – B PG 64-22 – DSR Original – Alambique	- 55 -
Tabla 4. 12 Variación entre muestras – B PG 64-22 – MSCR – Alambique	- 56 -
Tabla 4. 13. PG 70-22- 10 y 30 gramos– DSR Original-Alambique.....	- 57 -
Tabla 4. 14 Variación entre muestras – B PG 70-22 – DSR Original – Alambique	- 58 -
Tabla 4. 15 Variación entre muestras - B PG 70-22 – MSCR – Alambique.....	- 58 -
Tabla 4. 16. Resultados de muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Rotavapor.....	- 62 -
Tabla 4. 17. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Rotavapor.....	- 63 -
Tabla 4. 18. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – MSCR - Rotavapor	- 63 -
Tabla 4. 19. Resultados de muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Rotavapor.....	- 65 -
Tabla 4. 20. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Rotavapor.....	- 65 -
Tabla 4. 21. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – MSCR - Rotavapor	- 66 -
Tabla 4.22. Resultados de muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Alambique.....	- 67 -
Tabla 4.23. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Alambique.....	- 68 -
Tabla 4.24. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – MSCR - Alambique	- 69 -
Tabla 4. 25. Resultados de muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Alambique	- 70 -
Tabla 4. 26. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Alambique	- 70 -

Tabla 4. 27. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – MSCR - Alambique.....	- 71 -
Tabla 4. 28. Resultados de muestras – Emulsión – DSR Original - Rotavapor	- 73 -
Tabla 4. 29. Variación entre muestras - Emulsión – DSR Original - Rotavapor	- 74 -
Tabla 4. 30. Resultados de muestras – Emulsión – DSR Original - Rotavapor	- 74 -
Tabla 4. 31. Variación entre muestras - Emulsión – DSR Original - Alambique.....	- 75 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Esquema de la Red Nacional de Carreteras	- 7 -
Figura 2. 2 Reómetro de corte dinámico	- 13 -
Figura 2. 3 Horno Rotatorio de Película Delgada	- 14 -
Figura 2. 4 Olla de envejecimiento a presión	- 15 -
Figura 2. 5 Equipo de viga a flexión	- 16 -
Figura 2. 6 Plato base y platos de prueba.....	- 17 -
Figura 2. 7 Proceso para determinar el Grado PG en un asfalto producto de RAP	- 24 -
Figura 2. 8 Equipo para carga de la partícula	- 28 -
Figura 2. 9 Equipo Saybolt Furol.....	- 29 -
Figura 2. 10 Asentamiento.....	- 30 -
Figura 2. 11 Vertido de emulsión asfáltica en malla	- 31 -
Figura 3. 1 Esquema metodológico	- 33 -
Figura 3. 2 Ensayos para los valores de referencia de mezcla asfáltica.....	- 35 -
Figura 3.3 Rotavapor.....	- 35 -

Figura 3.4 Alambique	- 38 -
Figura 3.5 Proceso de extracción en el Rotarex (a) Mezcla asfáltica (b) Tricloroetileno (c) Rotarex (d) Agregado después de recuperación en el Rotarex (d) Asfalto + tricloroetileno – obtenido en la recuperación con Rotarex	- 41 -
Figura 3. 6 Ensayos para los valores de referencia para Reciclado en frío	- 43 -
Figura 3.7 Mala aplicación de vacío en una muestra de emulsión –	- 44 -
Figura 3. 8 Equipo de destilación en alambique.....	- 45 -
Figura 4. 1. Resultados de MSCR (PG 64-22) - Rotavapor	- 51 -
Figura 4. 2. Resultados de MSCR (PG 70-22) - Rotavapor.....	- 54 -
Figura 4. 3 Resultados de MSCR (PG 64-22) – Alambique.....	- 57 -
Figura 4. 4 Resultados de MSCR (PG 70-22) – Alambique.....	- 59 -
Figura 4. 5. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de laboratorio - Rotavapor	- 64 -
Figura 4. 6. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de planta - Rotavapor	- 66 -
Figura 4. 7. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de laboratorio - Alambique.....	- 69 -
Figura 4. 8. Resultados de MSCR obtenidos de los sfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de planta - Rotavapor	- 71 -

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales asfálticos tienen diversas aplicaciones en las vías terrestres, entre ellas, la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizantes ya sea para aglutinar los materiales pétreos, ligar o unir diferentes capas del pavimento, o bien, para estabilizar bases o subbases. Estos materiales se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación (SCT, 2006).

Según la Asociación de Reciclado y Recuperación de Asfalto (*Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, ARRA) el reciclado en caliente de RAP (*Recycled Asphalt Pavement*) es actualmente el método de reciclado de asfalto más utilizado en el mundo. Más de 50 millones de toneladas de RAP son generadas anualmente por las Agencias de Carreteras Estatales de Estados Unidos. De éstas, aproximadamente el 33% se utiliza en el reciclaje en caliente, el 47% se utiliza en otras aplicaciones de reciclaje o reutilización de asfalto y menos del 20% se desecha.

Los materiales presentes en los pavimentos recuperados pueden tener un valor monetario, incluso cuando los pavimentos han llegado al final de su vida útil. El interés en el uso del pavimento de asfalto reciclado (RAP), y el uso de las emulsiones, han ido ganando impulso en los últimos años debido a sus ventajas en la construcción de infraestructura de pavimentos en carreteras sostenibles. Mercado y Fuentes (2017), y Hong *et al.* (2014) coinciden en que se obtienen beneficios económicos mediante la disminución de los costos de construcción, así como de los costos de la eliminación del RAP y sostenibilidad medioambiental, por medio de la reducción de la demanda de nuevos materiales; por ende, se obtiene un ahorro de energía a través del reciclaje del asfalto usado, que se refleja en la reducción de la cantidad de asfalto virgen y del material pétreo empleado, reduciendo la explotación de recursos naturales no renovables.

El Asphalt Institute (1998), define el término “reciclado” como “la reutilización, usualmente luego de cierto grado de procesamiento, de un material que ya ha servido su propósito original”. La Asociación de Reciclado y Recuperación de Asfalto (ARRA) reconoce diferentes tipos de reciclado para asfaltos y mezclas asfálticas, y estos se clasifican en:

En función del lugar donde se lleva a cabo la mezcla:

- Reciclado “in situ”
- Reciclado “en planta”

En función de la temperatura de elaboración y colocación de la mezcla:

- Reciclado en frío
- Reciclado en caliente

En función del asfalto añadido:

- Con cemento asfáltico
- Con emulsiones asfálticas
- Con aglomerante hidráulico

Generalmente cada proceso de reciclado está formado por la combinación de las tecnologías mencionadas anteriormente.

Mercado y Fuentes (2017) mencionan que la caracterización de las emulsiones asfálticas y del RAP, es esencial para evaluar la calidad y, de acuerdo con algunas pruebas, establecer si pueden ser utilizados para una aplicación dada. McDaniel *et al.* (2001) sugieren que cuando se use más del 25 % de RAP en un asfalto mezclado en caliente (HMA, por sus siglas en inglés), los asfaltos, tanto del RAP, como del asfalto virgen, deben someterse a pruebas de propiedades PG o propiedades regionales.

Se sabe que en la actualidad el cemento asfáltico se clasifica como AC (*Asphalt Cement*) o como Grado PG (*Performance grade*). Por un lado, la clasificación AC se hace de acuerdo a la viscosidad dinámica a 60°C, por ejemplo, el asfalto convencional se clasifica como AC-20 y éste tiene una viscosidad de $200 \pm 40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (SCT, 2000); por otro lado, la clasificación en función del grado PG se realiza con

base en el desempeño de asfalto en término de tres modos de falla: deformación permanente (roderas), agrietamiento por fatiga, y agrietamiento por baja temperatura. Esta caracterización mide propiedades mecánicas, como son: el módulo dinámico de corte, el ángulo de fase, y el módulo de rigidez del asfalto en varias etapas y condiciones de servicio del pavimento mediante la aplicación de diferentes métodos de envejecimiento del asfalto (SCT, 2005). Adicional a la caracterización del Grado PG, también se realiza el ensayo de recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR), la cual evalúa la deformación permanente en cementos asfálticos mediante la aplicación de ciclos de carga y relajación de material, determinando así su habilidad para recuperar deformaciones (AASHTO M332-14).

La Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto (NAPA, S.A.) menciona que el RAP es generado comúnmente a través de dos procedimientos de recuperación: el fresado, y la remoción del espesor total del RAP. Posteriormente, con ayuda del Rotarex se extrae el asfalto del material pétreo y, por último, el asfalto tiene que pasar a través de una extracción de solvente.

Sirin y Paul (2018) señalan que, previo a la caracterización, resulta necesario la extracción del solvente (Bromuro de propilo normal, Tolueno, Tricloroetileno, Cloruro de metileno) en el asfalto. En el pasado, se han utilizado dos métodos principales: el método de recuperación de Abson, que se introdujo en 1933, y el método de evaporación rotativa (también llamado método Rotavapor), que se ha utilizado desde la década de 1970.

Se demostró que el método Abson (ASTM D1856) se realiza a una alta temperatura, provocando un endurecimiento excesivo del asfalto, y dejado una cantidad significativa de solvente en el asfalto recuperado (Cipione *et al.*, 1991). El método de Rotavapor usa un evaporador rotativo (ASTM D5404), este método tiene ventajas sobre el método Abson: primero, emplea temperaturas más bajas, que posteriormente causan menos envejecimiento del asfalto; segundo, la mayoría del disolvente se elimina mediante acción rotatoria (Norton Jr, 2012). Con los resultados

obtenidos de la evaluación realizada por Sirin y Paul (2018), indican que el grado de envejecimiento del proceso por rotavapor se ve afectado por variables tales como temperatura de proceso, duración y peso de la muestra.

La Asociación Nacional de Pavimentos de Asfaltos (*National Asphalt Pavement Association*, NAPA) (S.A.) menciona que el asfalto producto de RAP tiene que pasar a través de una extracción de solvente, mientras que el *Transportation Research Board* (TRB) (2007) coincide en que este proceso es cada vez más problemático, provocando cambios en las propiedades del asfalto, como cambios en su rigidez. Para la extracción del solvente existen diferentes métodos, destacando la de destilación y la de evaporación; en ambos métodos existen incógnitas sobre la temperatura final que afecta al asfalto. Así mismo, menciona que el residuo de asfalto debe ser recuperado con la menor cantidad de daños posibles para un análisis preciso del residuo. Hanz *et al.* (2010) realizaron comparaciones entre los métodos de recuperación del asfalto donde sugiere que se requiere un mayor número de investigaciones para comprender el nivel de envejecimiento que se presenta en campo, relacionándolo con el estado de envejecimiento del residuo producido por el método de recuperación. Tomando en cuenta esto, se considera hacer la evaluación reológica del asfalto recuperado de la emulsión y del RAP para conocer el impacto que tendrá el método de separación en el grado PG (*Performance Grade*).

Se sabe que el envejecimiento del asfalto se ve reflejado en la estructura del pavimento, por ello es fundamental reproducir este fenómeno de campo en laboratorio, ya sea para reutilizar o evaluar. Para evaluar el asfalto se hace necesario recuperarlo tal como estaba antes de emulsificarlo y, en el caso del RAP, quitar el solvente del asfalto. Para ambos casos es fundamental seleccionar el método de recuperación que tenga la menor influencia posible en el comportamiento mecánico del asfalto; sin embargo, aún existen dudas sobre que método es mejor.

Algunos estudios como el realizado por Hanz *et al.* (2014), indica que el método de Destilación tendrá un impacto mayor que el Rotavapor, sin embargo, aún no se conoce la magnitud de ese impacto, ni cómo afectará en el grado PG del asfalto.

1.1 Descripción del problema

Se sabe que el envejecimiento del asfalto se ve reflejado en la estructura del pavimento, por ello es fundamental reproducir el fenómeno de envejecimiento de campo en laboratorio, ya sea para reutilizar o evaluar. Para evaluar el asfalto se hace necesario recuperarlo tal como estaba antes de emulsificarlo y, en el caso del RAP, quitar el solvente del asfalto. Para ambos casos es fundamental seleccionar el método de recuperación que tenga la menor influencia posible en el comportamiento mecánico del asfalto; sin embargo, aún existen dudas sobre que método es mejor.

Algunos estudios indican que el método de Destilación tendrá un impacto mayor que el Rotavapor, sin embargo, aún no se conoce la magnitud de ese impacto, ni cómo afectará en las propiedades viscoelásticas lineales y deformación permanente.

1.2 Justificación

La Asociación Nacional de Pavimentos de Asfaltos (*National Asphalt Pavement Association*, NAPA) (S.A.) menciona que el asfalto producto de RAP tiene que pasar a través de una extracción de solvente, mientras que el *Transportation Research Board* (TRB) (2007) coincide en que este proceso es cada vez más problemático, provocando cambios en las propiedades del asfalto, como cambios en su rigidez. Para la extracción del solvente existen diferentes métodos, destacando la de destilación y la de evaporación; en ambos métodos existen incógnitas sobre la temperatura final que afecta al asfalto. Así mismo, menciona que el residuo de asfalto debe ser recuperado con la menor cantidad de daños posibles para un análisis preciso del residuo. Hanz *et al.* (2010) realizaron comparaciones entre los

métodos de recuperación del asfalto donde sugiere que se requiere un mayor número de investigaciones para comprender el nivel de envejecimiento que se presenta en campo, relacionándolo con el estado de envejecimiento del residuo producido por el método de recuperación. Tomando en cuenta esto, se considera hacer la evaluación reológica del asfalto recuperado de la emulsión y del RAP para conocer el impacto que tendrá el método de separación en el grado PG (*Performance Grade*).

1.3 Hipótesis

El método de extracción de rotavapor tiene menor impacto en las propiedades físicas y mecánicas del asfalto recuperado, reflejado en el grado de desempeño (Grado PG) que el método de destilación.

1.4 Objetivo

Evaluar la influencia del método de extracción del asfalto en las propiedades físicas y mecánicas del asfalto.

2. MARCO TEÓRICO

El crecimiento demográfico y el desarrollo económico han dado lugar a una extensa red de carreteras pavimentadas. Miles de kilómetros fueron construidos para satisfacer la demanda. La Red Nacional de Carreteras consta de 750,694 kilómetros (hasta diciembre de 2019), de acuerdo con Caminos y Puentes Federales, aproximadamente el 85% de las carreteras y calles están hechas de pavimento flexible.

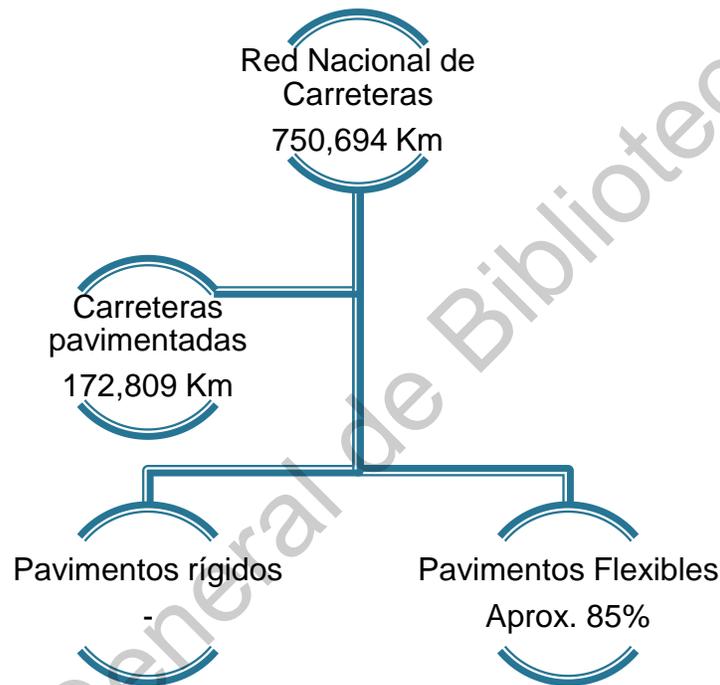


Figura 2. 1 Esquema de la Red Nacional de Carreteras

Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Mexicano del Transporte

A medida que la infraestructura de México se deteriora, estas carreteras y caminos deben ser mantenidos y rehabilitados. De acuerdo a la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés) los mismos materiales usados para construir el sistema original de carreteras pueden ser reutilizados para repáralos, reconstruirlos y mantenerlos (Copeland, 2011). Cuando el reciclaje se emplea de manera correcta hace que sea económico, con sentido ambiental e ingenieril.

2.1 Generalidades del pavimento

El concreto asfáltico es una mezcla de tres componentes básicos: asfalto, agregados y vacíos de aire. El comportamiento del concreto asfáltico se rige por las propiedades individuales de cada componente (agregado y asfalto) y por la interacción de estos en el sistema

2.1.1 Asfalto

Según la Real Academia Española, el asfalto es una sustancia de color negro que procede de la destilación del petróleo crudo, la normativa SCT-N-CMT-4-05-001 (2006) define al asfalto como un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales, al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

De acuerdo a Copeland (2011) el aglutinante de asfalto por sí solo es un material de construcción muy interesante y desafiante con que trabajar. Su característica más importante, que es a la vez una fortaleza y a veces una debilidad, es la susceptibilidad a la temperatura, es decir, sus propiedades medidas son dependiente de su temperatura. Así mismo el comportamiento también depende del tiempo de carga, la misma carga aplicada para una diferente duración hará que un asfalto muestre un comportamiento diferente; éste presenta mayor rigidez bajo periodos cortos de carga. Se considera al asfalto como un material viscoelástico, ya que temperaturas altas (aprox. $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) se comporta como un líquido viscoso y fluye. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir; mientras que a bajas temperaturas (aprox. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bajas cargas muy rápidas tiene un comportamiento sólido elástico; es decir, se deforman al ser cargados y retornan a su forma original al ser descargados. A las temperaturas intermedias que es donde se encuentran la mayoría de los sistemas de pavimento, el cemento

asfáltico presenta ambas características, la de un líquido viscoso y un sólido elástico (Asphalt Institute, 1998)

Existe otra característica especial de los asfaltos, debido a que están compuestos por moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto. El resultado es una estructura frágil, y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento.

2.1.1.1 Selección del Grado PG

Actualmente se clasifican por el Grado de Desempeño (PG por sus siglas en inglés) y es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico convencional o modificado se desempeña satisfactoriamente. El grado de desempeño (PG) permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante, de la intensidad de tránsito esperada y de la velocidad de operación a que estará sujeta la carretera durante su vida útil (N-CMT-5-004/18).

De acuerdo al Asphalt Institute (1998) la clasificación está basada en los extremos de temperatura del pavimento esperada durante su vida útil indicado mediante su notación PG X-Y.

Donde,

PG = grado de desempeño

X = temperatura máxima de diseño del pavimento

Y = temperatura mínima de diseño del pavimento

Es importante recalcar que las temperaturas para elegir un asfalto de acuerdo al Grado PG son temperaturas que experimentará el pavimento durante su vida útil, más no la temperatura ambiental de la región. La temperatura máxima del aire se refiere al promedio de temperatura de los 7 días consecutivos más calurosos del año, mientras que la temperatura mínima se refiere a la temperatura del aire más fría del año. Ambas temperaturas se deberán obtener de acuerdo a registros

meteorológicos del lugar del proyecto. Las temperaturas de diseño del pavimento pueden ser obtenidas mediante un cálculo por medio de la temperatura del ambiente, de a los modelos analizados por la Federal Highway Administration (1998).

De acuerdo con la normativa de la SCT (N- CMT-4-05-004/18), con los datos estadísticos de las temperaturas máximas y mínimas de la zona donde se vaya a realizar la obra, se determinarán la temperatura máxima $T_{máx}$, y la temperatura mínima, $T_{mín}$.

a) Temperatura máxima del pavimento

$$T_{máx_i} = 54,32 + 0,78T_{airM} - 0,0025Lat_i^2 - 15,14 \log(H + 25) + Z(9 + 0,61\sigma_{T_{airM}}^2)^{0,5}$$

Ecuación 2. 1

Donde:

$T_{máx_i}$ = 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, (°C)

T_{airM} = Temperatura máxima promedio del aire de los 7 días consecutivos más cálidos registrados por lo menos en los últimos 20 años en la zona, (°C)

Lat_i = Latitud, en el sitio $i = 1$ donde inicia el tramo o $i = 2$ donde termina el tramo por construir, (°, con aproximación de 5 decimales)

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

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

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

b) Temperatura mínima del pavimento

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

Ecuación 2.2

Donde:

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

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

Lat = Latitud del tramo de diseño, (°)

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

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

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

c) Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el Grado de Desempeño (PG) Seleccionado

Adicional a las temperaturas máximas y mínimas del Grado PG, se hace un nivel de ajuste considerando la intensidad de tránsito esperada y la velocidad de operación de la carretera, el cual se representará con una letra que indicará cuando el ajuste sea Norma (S), Alto (H), Muy alto (V) o Extremadamente Alto (E).

Tabla 2. 1. Nivel de ajuste

Velocidad de operación km/h Intensidad Del tránsito(ΣL) ^[1]	Nivel de ajuste		
	V > 70	20 ≤ v ≤ 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] ΣL 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

2.1.1.2 Recuperación elástica por CREEP repetido

La prueba de Recuperación de Creep repetida (MSCR, por sus siglas en inglés) es la última mejora de la especificación del asfalto *Superpave Performance Graded* (PG). Esta nueva prueba y especificación - listada como AASHTO TP70 y AASHTO MP19 - proporciona al usuario una nueva especificación de asfalto de alta temperatura que indica con más precisión el rendimiento de las roderas del asfalto con y sin modificar. Un beneficio importante de la nueva prueba MSCR es que elimina la necesidad de realizar pruebas como la recuperación elástica, la dureza, y la ductilidad, procedimientos diseñados específicamente para indicar la modificación del polímero de los asfaltos.

2.1.1.3 Ensayos para el Grado PG

Reómetro de corte dinámico (DSR)

El método estándar ASTM D7175 para determinar las propiedades reológicas de un asfalto utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR), el reómetro empleado para las pruebas fue un AR 2000 de la marca TA Instruments. que permite caracterizar las propiedades viscoelásticas del asfalto: módulo complejo de corte (G^*) y ángulo de fase (δ), a distintas temperaturas. La evaluación, se realiza en tres diferentes condiciones del asfalto: "original" o "no envejecido", envejecido en RTFO, y envejecido en PAV.



Figura 2. 2 Reómetro de corte dinámico

Fuente: Elaboración propia

- DSR en condición original

El procedimiento consiste en aplicar un esfuerzo sinusoidal a una muestra de asfalto (en condición original) 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 es $G^*/\text{Sen } \delta$ mayor o igual 1 kPa.

- DSR con residuo de RTFO

Este ensayo se realiza con asfalto residuo de RTFO, esto con el fin de evaluar la resistencia a la deformación permanente de un asfalto en el rango viscoelástico lineal, debido a que las roderas son más susceptibles a formarse al inicio de la del pavimento.

Este método de prueba consiste en el mismo procedimiento que se utiliza con una muestra en condición original. El equipo calcula el esfuerzo necesario para lograr que el material presente un 10% de deformación a una frecuencia de 10 rad/s. El parámetro es $G^*/\text{Sen } \delta$ mayor o igual 2.2 kPa.

- DSR con residuo de PAV

Este ensayo tiene como finalidad evaluar la resistencia a la fatiga del asfalto. Se evalúa en el residuo de PAV. El procedimiento de prueba es similar a lo que se realizó en el DSR en condición original y envejecido en RTFO, donde se aplica un esfuerzo sinusoidal a una muestra de asfalto, en este caso residuo de PAV, de 8 mm de diámetro y 2 mm de espesor, mediante dos platos paralelos. El equipo aplica un esfuerzo necesario para lograr que el material se deforme 1% a una frecuencia de 10 rad/s. El parámetro de prueba es $G^*(\text{Sen } \delta)$ menor o igual a 5000 kPa.

Envejecimiento en RTFO

Según ASTM D2872-12 el procedimiento del RTFO se puede utilizar para determinar el cambio de masa, que es una medida de la volatilidad del asfalto. Se colocan 8 vasos de vidrio para RTFO de manera horizontal dentro del horno de RTFO, cada uno con una muestra de 35 ± 0.5 g de asfalto, y se hacen girar a una velocidad de 15 ± 0.2 rpm con un flujo de aire constante de 4000 ± 200 mL/min, durante 85 min a una temperatura de 163 ± 0.5 °C.

Dos de los frascos se utilizan para cambio de masa, mientras que el asfalto de los seis restantes se recupera para ensayos posteriores.



Figura 2. 3 Horno Rotatorio de Película Delgada

Fuente: Elaboración propia

Envejecimiento en PAV

Según el ASTM D6521-13, el PAV tiene el objetivo de simular el envejecimiento por oxidación (a largo plazo) de los asfaltos durante la vida de servicio de los pavimentos. El asfalto utilizado para representar este envejecimiento acelerado es el residuo de RTFO, ya que, una vez envejecido el asfalto en la etapa constructiva, se envejecerá ese mismo durante la vida útil del pavimento.

El ensayo se efectúa utilizando una Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV) marca Controls, dentro de la cual se coloca el estante con las charolas para PAV con 50 ± 0.5 g de residuo de RTFO en cada una. La prueba se lleva a cabo a una temperatura de 100°C con una presión constante de 2.1 ± 0.1 MPa durante $20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$.



Figura 2. 4 Olla de envejecimiento a presión

Fuente: Elaboración propia

BBR

Para el ensayo del BBR (Reómetro de viga a flexión) se realiza de acuerdo con la norma ASTM D6648 (2008); Este ensayo evalúa el agrietamiento que sufre un pavimento debido a las bajas temperaturas experimentadas durante su vida útil, se utiliza residuo de PAV debido a que es el asfalto en su condición más rígida, cuando es más propenso a presentar este modo de falla. Las temperaturas de prueba para este ensayo se basan en la mínima que el asfalto experimentará en el área

geográfica donde será utilizado. El equipo se utiliza para medir la deflexión al centro de una viga de asfalto simplemente apoyada, sujeta a carga constante aplicada al centro, a una temperatura baja constante (desde 0 hasta -36 °C). El ensayo comienza cuando un espécimen prismático, de dimensiones $127 \pm 5 \text{ mm} \times 6.35 \pm 0.05 \text{ mm} \times 12.7 \pm 0.05 \text{ mm}$, se coloca en un baño de temperatura controlada y se le aplica una carga de $980 \pm 50 \text{ mN}$ durante $240 \text{ s} = 4 \text{ min}$. Se calcula la deformación máxima mediante las dimensiones específicas del espécimen y la deflexión medida durante el ensayo a 8, 15, 30, 60, 120 y 240 s. Debido a que un valor alto de la rigidez a la flexión, S , indica mayores esfuerzos térmicos, se especificó en la misma normativa un valor máximo de 300 MPa. La pendiente, m , de la curva rigidez vs. tiempo es un indicativo de la habilidad del asfalto para disipar esfuerzos; motivo por el cual se especificó un valor mínimo de 0.300.



Figura 2. 5 Equipo de viga a flexión

Fuente: Elaboración propia

Deformación permanente

Adicionalmente se determina su grado de desempeño usando el ensayo de recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR) empleando la norma de la AASHTO M332-14. La cual evalúa la deformación permanente en cementos asfálticos mediante la aplicación de ciclos de carga y relajación de material,

determinando así su habilidad para recuperar deformaciones. El ensayo se ejecuta en el reómetro de corte dinámico (DSR) con una muestra residuo de RTFO de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor y consiste en aplicar un esfuerzo controlado de 0.1 kPa durante 20 ciclos y posteriormente aplicar un esfuerzo de 3.2 kPa durante otros 10 ciclos. Cada ciclo consiste en la aplicación del esfuerzo durante 1 s y posteriormente 9 s de recuperación, resultando una duración total de 10 s por ciclo.

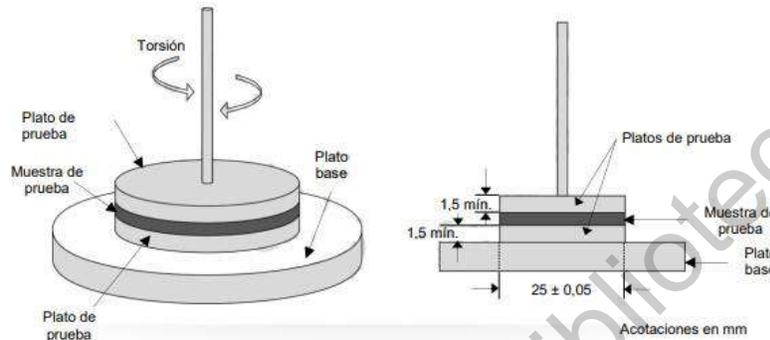


Figura 2. 6 Plato base y platos de prueba

Fuente: M-MMP-4-05-055/17

2.1.2 Reciclaje de pavimentos asfálticos

El reciclado de mezcla asfáltica puede clasificarse de diversas maneras: una primera gran familia la conforman los reciclados In situ/In Place o “en el lugar”. En este caso pueden ser en caliente o en frío, en la cual se utilizan equipos autopropulsados que realizan todas las operaciones de manera consecutiva: fresado, mezclado, extendido y algunos casos pre compactación del material.

El otro tipo de reciclado es en Planta/Off Site. Esta técnica tiene tres variantes posibles: en caliente (la más utilizada), frío (es poco común) o tibio (se encuentra en desarrollo).

Se trata de disminuir las temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente (tecnología conocida como Warm Asphalt o mezclas tibias) o incrementar levemente la temperatura de fabricación de las mezclas en frío con emulsión

(conocidas como mezclas templadas con emulsión). Esta tendencia en la tecnología de fabricación, se extiende a las mezclas recicladas con diferentes tasas de RAP.

Los viejos pavimentos de asfalto se fresan y se reciclan en nuevas mezclas para el mismo proyecto o se almacenan para su uso posterior. Es necesario ajustar el valor del pavimento asfáltico recuperado para tener en cuenta los costos de transporte, almacenamiento, procesamiento (si lo hay), manipulación y ensayo. Los ensayos son importantes para determinar las características del RAP como componente de la Mezcla en caliente (HMA por sus siglas en inglés).

2.1.2.1 Reciclado en caliente

La utilización de RAP en carreteras se ha convertido en una estrategia importante para ayudar a compensar el aumento de precio de la materia prima y mejorar la sostenibilidad de la infraestructura de transporte. En las últimas décadas, su uso en mezclas asfálticas ha experimentado una expansión significativa debido al aumento de los costos de los materiales y a una mayor conciencia de los procesos de construcción más orientados al medio ambiente (Riccardi, *et al.*, 2017).

Los materiales asfálticos recuperados durante las operaciones de rehabilitación o reconstrucción pueden ser utilizados nuevamente en mezclas asfálticas como agregado y asfalto complementario (Leiva Villacorta y Vargas Nordbeck , 2017)

En el caso de las mezclas asfálticas recicladas en caliente, los asfaltos utilizados pueden ser de diferente consistencia (convencionales o modificados), con la posible adición de agentes rejuvenecedores para lograr la “reactivación” del asfalto envejecido de la mezcla.

El reciclado en caliente es el proceso de combinar el RAP con agregados y asfaltos nuevos o “vírgenes” y/o agentes rejuvenecedores en una planta para producir una mezcla reciclada. Este método utiliza transferencia de calor para ablandar el Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) (ARRA,2001)

La norma AASHTO R35 recomienda tres niveles de uso de RAP. El primer nivel establece la cantidad máxima de RAP de 15% que se puede utilizar sin cambiar el

grado del asfalto virgen. El segundo nivel, de 15 a 25%, se puede utilizar cuando el grado de desempeño del asfalto virgen se reduce en un grado. El tercer nivel es para los contenidos de RAP superiores (más del 25 %); para estos contenidos más altos, es necesario extraer, recuperar, y ensayar el asfalto RAP para construir un gráfico de mezcla.

También se ha reconocido que con el aumento del uso del RAP en la mezcla de asfalto en caliente (HMA, por sus siglas en inglés), es primordial desarrollar métodos para el análisis de asfalto extraído y recuperado para asegurar que la modificación no está afectando negativamente el rendimiento de la mezcla en servicio (Ding, *et al.*, 2018). Las limitaciones se deben a que la interacción entre el asfalto virgen y el residuo del RAP es desconocida, ya que el asfalto envejecido tiende a ser más rígido. Las propiedades del asfalto envejecido dependen del nivel de daño al pavimento reciclado (Smiljanic *et al.* 1993). Cuanto mayor es el daño al pavimento antes del reciclado, mayores son los cambios en las propiedades del asfalto. Esto es por la reducción de la susceptibilidad a la oxidación en pavimentos mejor conservados. El almacenamiento también acelera el envejecimiento del asfalto ya que el material es más propenso a la exposición al aire y a la oxidación (McMillan y Palsat, 1985). Como el asfalto reacciona y pierde algunos de sus componentes durante el proceso de envejecimiento, su comportamiento reológico diferirá naturalmente de los materiales vírgenes. Esto sugiere la importancia de controlar el proceso de mezcla entre asfalto reciclados y vírgenes. Si el aglutinante viejo es demasiado rígido, la mezcla de aglutinantes viejos y vírgenes puede no funcionar como se espera. A pequeños porcentajes (hasta un 20%), un asfalto envejecido no afecta significativamente las propiedades de la mezcla de asfalto virgen y RAP (Kennedy *et al.* 1998). Sin embargo, cuando se utiliza en porcentajes intermedios o superiores, un asfalto envejecido puede influir significativamente en las propiedades de la mezcla y puede afectar al grado de asfalto resultante.

Una evaluación fiable y práctica de las propiedades del asfalto RAP es necesaria para utilizar eficientemente los materiales RAP en mezclas asfálticas recicladas. La caracterización del asfalto RAP se realiza comúnmente después del proceso de

extracción y recuperación. Este método no sólo requiere mucho tiempo, sino que, como han documentado varios estudios, altera las propiedades del aglutinante y da lugar a mediciones erróneas (Ma y Huang, 2008).

Hay dos razones para la separación del asfalto de la mezcla: en primer lugar, para determinar el contenido de asfalto en la mezcla asfáltica y, en segundo lugar, para determinar los cambios en las propiedades del asfalto debido a una manipulación inadecuada en el proceso de construcción (por ejemplo, calentamiento excesivo, etc.) o envejecimiento durante la vida útil. La recuperación de asfaltos también es necesaria para fines de investigación, como el desarrollo de nuevos procedimientos de envejecimiento a largo plazo.

Tamaño de la muestra

El tamaño del muestreo de RAP depende del propósito. Si se desea conocer la gradación y el contenido de asfalto o con el fin de vigilar la variabilidad para las pruebas de control de calidad, una muestra de 10 kg será suficiente. Si la muestra de material se usará para el diseño de la mezcla entonces se requerirá un tamaño mayor, de aproximadamente 25 kg.

Extracción y recuperación del asfalto y agregado de RAP

Es importante determinar la cantidad de asfalto asfáltico que está presente en el material de RAP, para considerarlos en el proceso de diseño de la mezcla. Así mismo, se considera las propiedades físicas del agregado RAP, como la gradación y la forma de la partícula. Dichas propiedades pueden medirse haciendo una extracción del RAP para medir el contenido de asfalto y obtener el agregado sin asfalto.

Según Zhang y Huber (1996), la extracción por disolvente y el método del horno de ignición ayudan a determinar el contenido de asfalto y la gradación de los agregados, ambos necesarios para diseñar el HMA mientras se utiliza un alto RAP.

Métodos de extracción

Hay muchos métodos para la extracción del asfalto como se describe en las normas ASTM. Los métodos generales de extracción de ASTM D2172-17 son la extracción por centrifugado (Método A), la extracción por reflujo (Métodos B, C, D), y la extracción al vacío (Método E).

Tabla 2. 2. Resumen de los métodos de extracción

Extracción	Método	Solvente	Ventajas	Desventajas
Centrifuga	A	Frío	Prueba simple Puede utilizarse para medir las propiedades del asfalto	Deja un 4% de asfalto
Reflujo	B,C,D	Caliente	Práctico	Efectos de envejecimiento por la alta temperatura Causa el endurecimiento del asfalto No debe utilizarse para medir las propiedades del asfalto
Vacío	E	Frío	No hay envejecimiento por alta temperatura	No hay mucha información

Fuente: Mehta *et al.* (2012)

Métodos de recuperación

Ding, *et al.* (2018) mencionan que una de las primeras preocupaciones que vienen a la mente cuando se utiliza el asfalto extraído con disolvente para la clasificación del rendimiento es si la duración de la exposición del asfalto al disolvente tiene algún efecto significativo sobre las propiedades determinadas.

Hay dos métodos utilizados para recuperar el asfalto del disolvente de extracción. El primer método es el método de recuperación del Abson. Según investigaciones anteriores, el método Abson deja una cantidad considerable de disolvente residual en el asfalto, lo que crea una reducción de la rigidez del asfalto. Este método también utiliza altas temperaturas que envejecen el asfalto (Robertson *et al.* 1991)

El segundo método emplea un evaporador rotativo (ASTM D5404-03 y AASHTO T319-08). Este método tiene varias ventajas sobre el método Abson en que utiliza temperaturas más bajas, mezclándose con una consistencia uniforme del aglutinante, procedimiento simple y menos intensivo en mano de obra. En este método, la mayor parte del disolvente residual se elimina con la acción rotatoria. Un beneficio de usar temperaturas más bajas es que resulta en un menor envejecimiento del aglutinante.

La norma ASTM D7906-14 para la recuperación de asfalto a partir de una solución que utiliza tolueno y el evaporador rotativo establece específicamente lo siguiente: "Se advierte a los usuarios que las propiedades del asfalto recuperado de una muestra de mezcla asfáltica pueden no representar exactamente las propiedades del asfalto original del asfalto debido a factores ajenos al control del laboratorio, como el envejecimiento, la contaminación y los cambios moleculares causados por la exposición al calor y a los disolventes. Por consiguiente, las propiedades del aglutinante de asfalto recuperado no deben utilizarse como base para su aceptación".

El método AASHTO T170, "Recuperación del asfalto de la solución por el método Abson" se ha utilizado ampliamente durante muchos años. Este método implica hervir el disolvente y dejar el asfalto. El disolvente se vuelve a condensar en un líquido. El método Rotavapor es similar al método AASHTO T170, pero la mezcla de disolvente y asfalto se calienta más suavemente en un matraz rotativo en agua. El procedimiento SHRP modificado (AASHTO TP2 modificado) es el método preferido para extraer y recuperar el asfalto porque el método da lugar a cambios menos severos en las propiedades del asfalto. Esta técnica de extracción y recuperación utiliza un cilindro de extracción que se gira sobre su lado para mezclar completamente el disolvente con la mezcla de asfalto. El disolvente y el asfalto que lleva se eliminan de la muestra mediante la fijación de un vacío en el fondo del frasco. A continuación, este extracto se filtra para eliminar las partículas de agregados finos antes de que el extracto se recoja en un matraz de recuperación.

Selección del Grado PG para RAP

El grado del asfalto deseado para una mezcla asfáltica se determina en base al clima y nivel de tráfico, como se menciona en el punto 2.1.1. Sin embargo, cuando se emplea RAP, el grado del asfalto virgen puede ser cambiado, Es necesario seguir las recomendaciones de la tabla 2.2 para elegir el porcentaje de RAP a emplear

Tabla 2.3 Porcentaje de RAP

Grado del Cemento Asfáltico nuevo recomendado	PG de CA recuperado del RAP		
	PG XX-22 o menor	PG XX-16	PG XX-10 o mayor
No cambiar la selección del PG nuevo de proyecto	< 20%	< 15%	< 10%
PG nuevo deberá ser un Grado menor que el de la mezcla (Ej: Seleccionar PG 58-28 si el req. 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)

Una vez que el asfalto de RAP se ha extraído y recuperado, es necesario determinar sus propiedades, llevando a cabo el procedimiento que se muestra en la Figura 2.7:

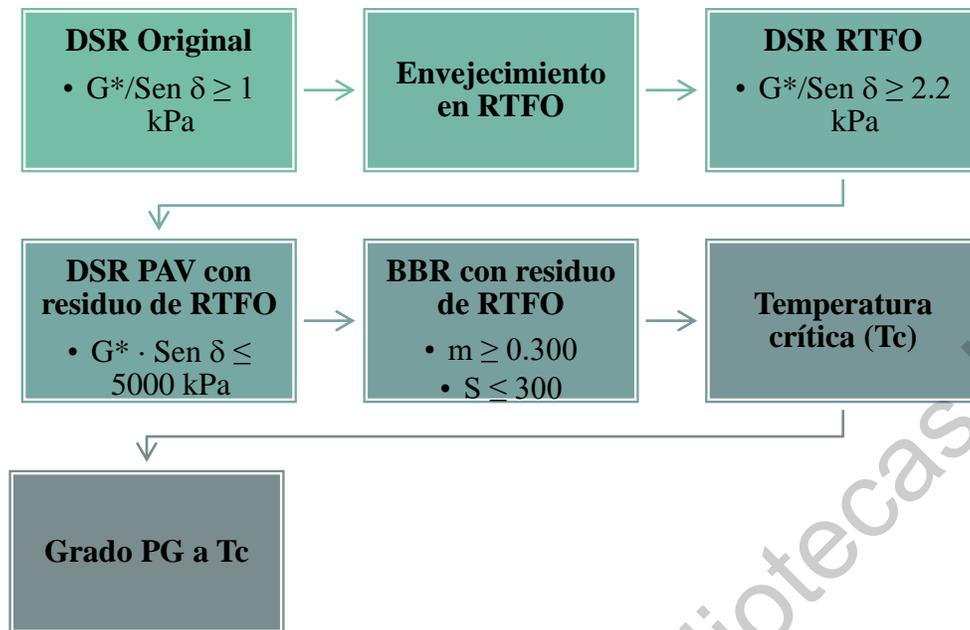


Figura 2. 7 Proceso para determinar el Grado PG en un asfalto producto de RAP

Fuente: (McDaniel y Anderson, 2001)

La temperatura crítica es el valor de la temperatura exacta para cada criterio de resistencia. Para la temperatura crítica alta (T_c High), se calcula de la siguiente forma:

1. Determinar la pendiente de la curva rigidez-temperatura como $\Delta \text{Log } (G^*/\text{Sen}\delta)/\Delta T$
2. Determinar T_c con una precisión de 0.1 °C como se muestra en la tabla 2.3

Tabla 2. 4 Temperatura critica

Prueba	Ecuación
DSR Original	$T_c (Alta Orig) = \left(\frac{\log(1.0) - \log(G_1)}{a} \right) + T_1$
Envejecimiento en RTFO	
DSR RTFO	$T_c (Alta RTFO) = \left(\frac{\log(2.2) - \log(G_1)}{a} \right) + T_1$
DSR - PAV	$T_c (Int) = \left(\frac{\log(5000) - \log(G_1)}{a} \right) + T_1$
BBR	$T_c (Baja S) = \left(\frac{\log(300) - \log(S_1)}{a} \right) + T_1$
	$T_c (Baja m) = \left(\frac{0.300 - m_1}{a} \right) + T_1$

Fuente: (McDaniel y Anderson, 2001)

Donde:

G_1 = El valor de $G^*/\text{Sen}\delta$ a una temperatura específica, T_1

S_1 = El valor de la rigidez a una temperatura específica, T_1

m_1 = El valor de la pendiente a una temperatura específica, T_1

a = Pendiente de la curva de temperatura-rigidez descrito en el paso 1.

2.1.2.2 Reciclado en frío: Emulsiones asfálticas

El aumento de la construcción de carreteras está dando lugar a un aumento proporcional de la producción de gases de efecto invernadero que causa el calentamiento del planeta. Para ello se están adoptando una serie de medidas y el asfalto de mezcla en frío (CMA, por sus siglas en inglés) es una de esas medidas que se utiliza en la construcción de carreteras para reducir la producción de gases de efecto invernadero. El asfalto de mezcla en frío se produce mezclando asfalto emulsionado; este proceso no requiere ningún tipo de calentamiento de los agregados, lo que hace que la CMA sea económica y relativamente libre de contaminación (Al-Busaltan *et al.*, 2012). Para la fabricación de la mezcla en frío, la temperatura requerida está en el rango de 0 a 40 °C. La producción de mezcla en frío no requiere una gran inversión en equipo, lo que también facilita su adopción. La mezcla en frío puede utilizarse en zonas remotas, puede utilizarse tanto para la

construcción inicial (mezclas 100% vírgenes) como para el reciclado del pavimento asfáltico (uso de RAP). Las principales ventajas de la mezcla en frío son la rentabilidad, la compatibilidad con el medio ambiente, la reducción de las emisiones y la fácil disponibilidad. Algunas de las desventajas del uso de la mezcla en frío son la menor resistencia, los mayores vacíos y la mayor susceptibilidad a la humedad.

Según el *Asphalt Institute* (S.A.), una emulsión asfáltica consiste de tres ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsivo. En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura. Algunos de los mismo principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr la dispersión estable del cemento asfáltico en el agua – suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezclado.

Clasificación de las Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónica, catiónica, y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Las no iónicas pueden ganar en importancia a medida que la tecnología de emulsiones avance. Las denominaciones aniónica y catiónica se refieren a las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad básica – las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

Las letras “HF” que preceden a algunos de los grados de emulsiones aniónicas indican alta flotación, medida con el ensayo de flotación. Estos grados de emulsiones se usan principalmente para mezclas de planta en caliente y en frío, para sellados y para mezclas en camino.

ASTM Y AASHTO han desarrollado especificaciones normalizadas para estos grados de emulsión.

- Agentes Emulsivos

Las propiedades de las emulsiones asfálticas dependen en gran medida de los agentes químicos utilizados como emulsivos. El emulsivo es un agente tenso-activo o surfactante. El agente emulsivo mantiene las gotitas de asfalto en suspensión estable y controla el tiempo de rotura. Es también el factor determinante en la clasificación de las emulsiones como aniónicas, catiónicas o no-iónicas.

Los agentes emulsivos aniónicos más comunes son los ácidos grasos, que son productos derivados la madera, como aceites (resinas, ligninas, etc.). Los emulsivos aniónicos son saponificados (convertidos en jabón) al reaccionar con hidróxido de sodio o hidróxido de potasio.

Los agentes emulsivos catiónicos, en su mayoría, son aminas grasas, p. ej. diaminas, imidazolinas y amidoaminas. Las aminas se convierten al reaccionar con un ácido, usualmente ácido clorhídrico. Otro tipo de agente emulsivo, las sales grasas cuaternarias de amonio, se emplea para producir emulsiones catiónicas. Son sales solubles en agua, y no requieren la adición del ácido. Son agentes emulsivos estables y efectivos.

- Ensayos sobre Emulsiones Asfálticas

Una adecuada manipulación de la muestra es importante para lograr resultados de ensayos que sean válidos. las emulsiones asfálticas se elaboran en caliente, algunas son almacenadas en caliente, y algunos son transportadas y aplicadas en caliente.

Ensayo de Carga de las Partículas



Figura 2. 8 Equipo para carga de la partícula

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de carga de las partículas es utilizado para identificar emulsiones catiónicas. Para su realización, se sumergen, en una muestra de emulsión, un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo); finalizado el ensayo, se observan los electrodos para determinar si en el cátodo se ha depositado una apreciable capa de asfalto. De ser así, se trata de una emulsión catiónica.

Viscosidad Saybolt Furol



Figura 2. 9 Equipo Saybolt Furol

Fuente: Elaboración propia

La viscosidad es definida como la resistencia de un fluido a fluir. Para emulsiones asfálticas, el ensayo de viscosidad Saybolt Furol, es utilizado como una medida de la viscosidad. Los resultados se expresan en segundos Saybolt Furol. Dependiendo del tipo de emulsión, el ensayo se realiza a una de dos temperaturas, 25°C (77°F) o 50 °C (122°F).

Ensayo de demulsibilidad

Este ensayo indica la velocidad relativa a las que los glóbulos de asfalto coloidales de una emulsión asfáltica de rotura rápida romperán cuando se extienden en finas películas sobre suelo o agregado. El cloruro de calcio provoca la coalescencia de los minúsculos glóbulos de asfalto presentes en una emulsión asfáltica aniónica. Se mezcla completamente una solución de cloruro de calcio y agua con una emulsión de rotura rápida; la mezcla se vierte a través un tamiz para determinar el grado de coalescencia de los glóbulos de asfalto. Las especificaciones prescriben la concentración de la solución y la mínima cantidad de asfalto a ser retenida por el

tamiz (usualmente el 60%). Es de esperar que las emulsiones de rotura rápida rompan casi inmediatamente luego de entrar en contacto con el agregado, como en el caso de los tratamientos superficiales.

Ensayos de Sedimentación y de Estabilidad para Almacenamiento



Figura 2. 10 Asentamiento

Fuente: Elaboración propia

Estos ensayos ponen de manifiesto la estabilidad de la emulsión durante el almacenamiento. Ellos detectan la tendencia de los glóbulos de asfalto a sedimentar a lo largo de un periodo de tiempo. Un dado volumen de emulsión se deja reposar en una probeta graduada durante un lapso especificado (cinco días para el ensayo de sedimentación y 24 horas para el ensayo de estabilidad para almacenamiento). Luego se toman muestras del fondo y de la superficie de la probeta. Cada muestra se coloca en un vaso de precipitado y es pesado y calentada hasta evaporar el agua. Luego se pesa el residuo. Los pesos obtenidos se utilizan para hallar la diferencia, si la hay, entre los contenidos de residuo asfáltico de las fracciones superior e inferior de la probeta. Dicha diferencia es una medida de la sedimentación.

Retenido en malla



Figura 2. 11 Vertido de emulsión asfáltica en malla

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de tamiz es otra forma de medir la calidad y la estabilidad de la emulsión. La retención de una excesiva cantidad de partículas de asfalto sobre un tamiz indica que puede haber problemas en la manipulación y aplicación del material. En este ensayo, una muestra representativa de emulsión asfáltica es vertida a través de un tamiz de 850 mm (N° 20). En el caso de emulsiones aniónicas, el tamiz y el asfalto retenido son lavados primero con una solución débil de oleato de sodio y luego con agua destilada. Para emulsiones catiónicas, el lavado solo se hace con agua destilada. Luego del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en estufa, determinándose el peso del asfalto retenido.

Capacidad de Recubrimiento y Resistencia al Agua

Este ensayo tiene tres propósitos. Determina la capacidad de una emulsión asfáltica a: (1) recubrir el agregado completamente, (2) resistir el efecto del mezclado mientras permanece como una película sobre los agregados y (3) resistir la acción de lavado del agua una vez finalizada la mezcla. Este ensayo se emplea principalmente para identificar a las emulsiones asfálticas de rotura media adecuadas para mezclarse con agregados gruesos calcáreos. Este ensayo no es aplicable a emulsiones asfálticas de roturas rápida o lenta.

El agregado patrón es recubierto con polvo de carbonato de calcio y luego mezclado con la emulsión asfáltica. Aproximadamente la mitad de la mezcla es colocada sobre un papel absorbente, para un examen visual del área de agregado recubierta por la emulsión asfáltica. El resto de la mezcla es rociado con agua, y lavado hasta que al agua corra clara. Este material es colocado sobre un papel absorbente, y se examina su recubrimiento. Se repite el ensayo y, en esta oportunidad, el agregado se moja en agua antes de agregar la emulsión; se mezcla, y luego se examina visualmente su capacidad de recubrimiento (buena, regular o pobre).

3. METODOLOGÍA

La investigación experimental, la cual se llevó a cabo en el Laboratorio de Infraestructura – División de Asfaltos y Mezclas Asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y se dividió en dos etapas, la primera fue la evaluación del asfalto de un pavimento existente para su uso en un Reciclado en caliente y la segunda la recuperación de una emulsión asfáltica para su uso en un reciclado en frío

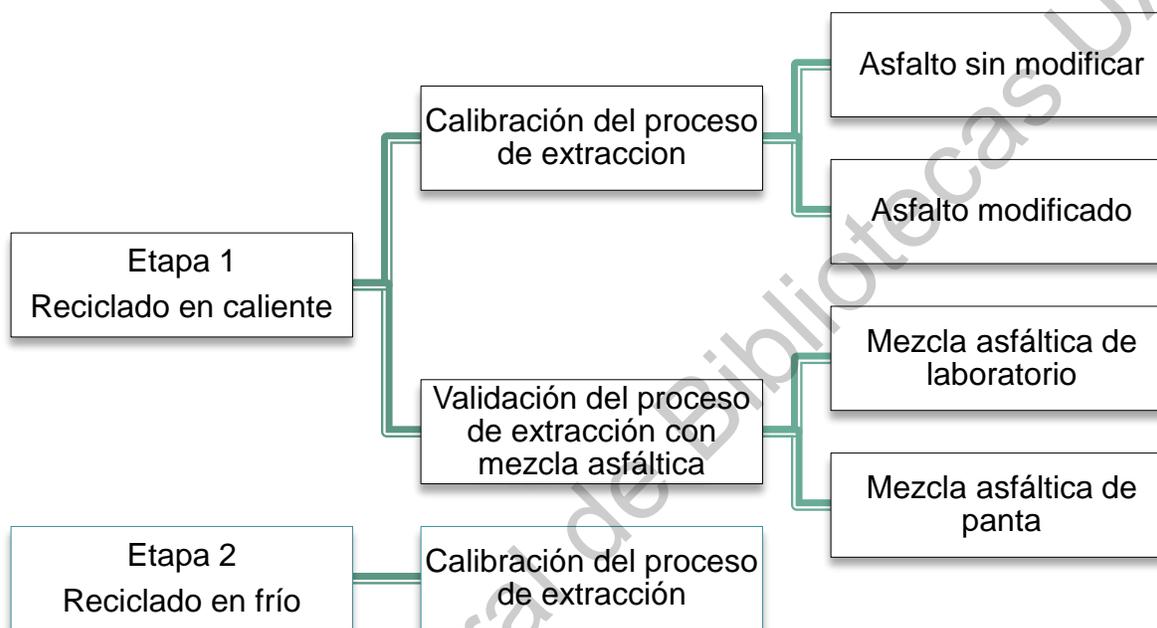
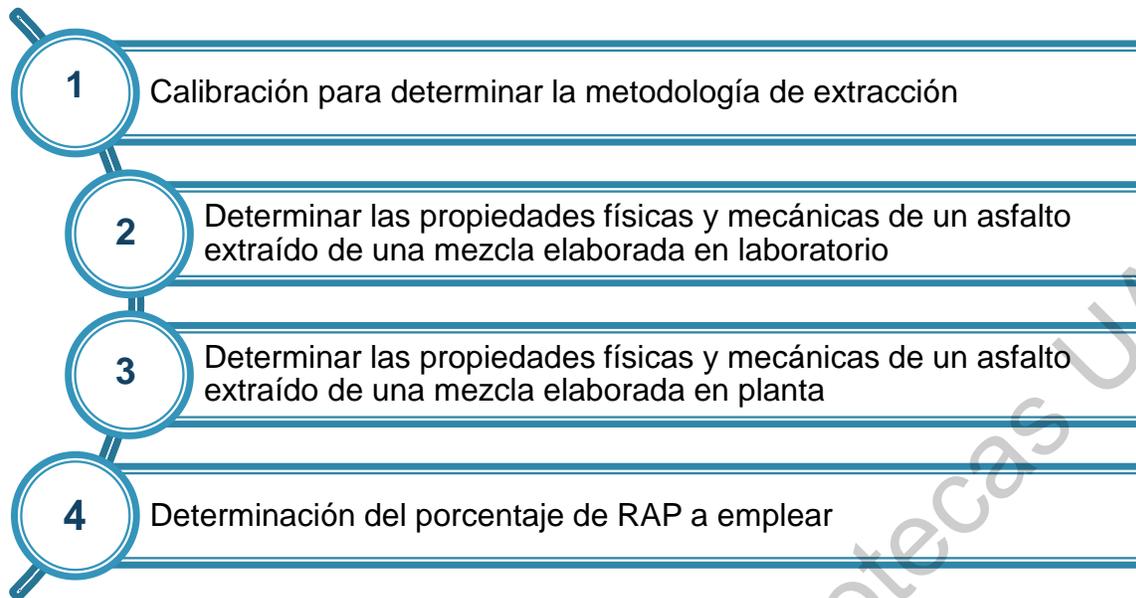


Figura 3. 1 Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

3.1 Reciclado en caliente

En la revisión bibliográfica no se encontró un procedimiento detallado y consensado para la extracción del asfalto de un material de RAP. Es por esa razón que la metodología del estudio contempló definir tanto un procedimiento de evaluación como de extracción del asfalto. Por lo cual, esta primera etapa se dividió en cuatro objetivos particulares, los cuales se mencionan a continuación:



Se trabajó con tres materiales asfálticos, un material suministrado por la refinería Salamanca clasificado como PG 64-22, el cual se denominó “asfalto base”, un asfalto modificado en el laboratorio de Asfaltos del Instituto Mexicano del Transporte de Grado PG 70-22 y por último un asfalto PG 76-22, provisto por la empresa ESMA Ingeniería, los cuales fueron utilizados en diferentes procesos de la primera etapa. Con el objetivo de ubicar los resultados de los asfaltos en cada proceso se estableció una nomenclatura para cada uno de ellos, la cual se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Nomenclatura de los asfaltos en los diferentes procesos de la primera etapa del estudio.

Proceso	Material base	Grado PG	Nomenclatura
1. Calibración del ensayo	Sin modificar	64-22	B PG 64-22
1. Validación para un asfalto modificado	Modificado	70-22	B PG 70-22
2. Mezcla asfáltica en laboratorio	Sin modificar	64-22	MA PG 64-22
	Modificado	70-22	MA PG 70-22
2. Mezcla asfáltica en Planta	Modificado	76-22	MA PG 76-22

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Calibración del proceso de extracción

Esta etapa se denominó como “Calibración del ensayo”, como se mencionó anteriormente, fue el primer objetivo particular de la primera etapa y estableció un procedimiento de ensayo de extracción que buscó asegurar la reproducibilidad de las mediciones sin afectar las características del asfalto evaluado.

En esta evaluación se utilizaron dos tipos de asfalto, el asfalto convencional “B PG 64-22” y el asfalto modificado en laboratorio “B PG 70-22”. Para obtener los valores de referencia de los asfaltos base se caracterizaron de acuerdo con la metodología Superpave **Grado PG** (ASTM D6373), e incluye los siguientes ensayos:

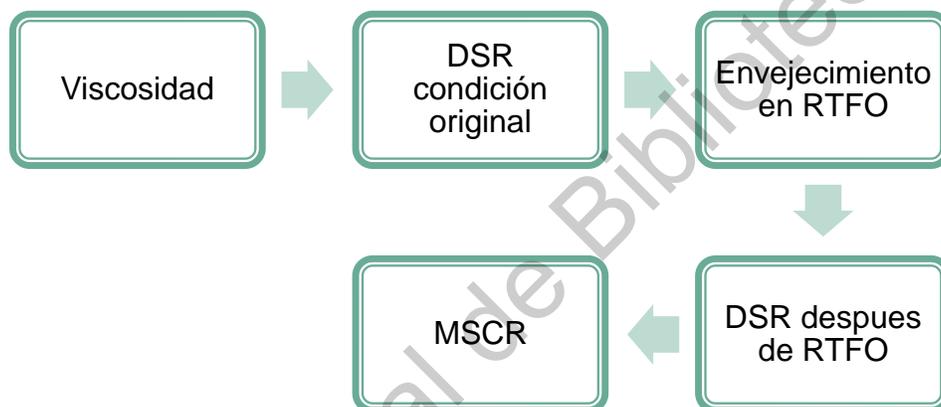


Figura 3. 2 Ensayos para los valores de referencia de mezcla asfáltica

Fuente: Elaboración propia

A) Calibración del proceso de extracción con Rotavapor



Figura 3.3 Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

Una de las primeras preguntas en la ejecución del protocolo de ensayo era si realmente se podía eliminar el solvente del asfalto después de la extracción y si al elevar la temperatura se produciría un envejecimiento excesivo en el asfalto.

Con el fin de responder a este cuestionamiento, se realizó un procedimiento de calibración con el asfalto "B PG 64-22". Para ello, se tomaron porciones de **10 y 30** gramos, estas masas de asfalto simulaban la concentración de asfalto que se tiene cuando se recupera el asfalto del RAP; se tomó un rango amplio de la cantidad de asfalto, ya que no se conocía con certeza el porcentaje de asfalto con la que fue diseñada la mezcla.

Para determinar la cantidad de asfalto en la mezcla, se empleó la ecuación (3.1)

$$\frac{C.A * MA}{100}$$

Ecuación 3. 1

Donde:

C.A= Cemento Asfáltico

MA=Mezcla Asfáltico

De los valores típicos se propuso 5.5% de asfalto, lo que significa que, de 1000 g de mezcla asfáltica, se obtiene 55 g de asfalto.

$$\frac{5.5 * 1000}{100} = 55g \text{ de asfalto}$$

En condiciones ideales, para el lavado de 1000 g de mezcla asfáltica, se emplean aproximadamente 2000 g de tricloroetileno. Por lo tanto, después del lavado se obtienen 2000 g de tricloroetileno en los que se encuentran disueltos 55 g de asfalto. Si para la extracción se emplean 500 g de tricloroetileno + asfalto, por consiguiente, se recuperarían aproximadamente 13 g de asfalto.

El proceso que se siguió para esta calibración se describe e ilustra en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 2 Proceso de calibración con el Rotavapor

Proceso	
1. Las porciones de asfalto se diluyeron en 500 ml de tricloroetileno	
2. Se destiló con ayuda del rotavapor a temperaturas de 110 a 140°C. El baño de aceite se calentó a la temperatura de ensayo.	
3. El matraz contenía aproximadamente 500 ml de tricloroetileno con asfalto, misma que se introdujo al baño de aceite para proceder a la rotación del matraz de destilación a 40 rpm.	
4. Se aplicó un vacío inicial de 5.3 KPa y, cuando no se observó más condensación, se aumentó la presión a 80 kPa. Esta condición se mantuvo durante 15 min.	
5. Al final se removió el matraz de destilación del aparato y se limpió el aceite adherido. El asfalto fue vertido en un recipiente apropiado, el matraz se invirtió y se colocó en un horno a una temperatura de 140°C durante aproximadamente 15 minutos	

B) Calibración del proceso de extracción con Alambique



Figura 3.4 Alambique
Fuente: Elaboración propia

En este apartado, se buscó verificar si con este método de extracción era posible eliminar todo el solvente (tricloroetileno) del asfalto, y posteriormente determinar el grado de envejecimiento del mismo. Para poder llevar a cabo este proceso, se tomaron porciones de 10 y 30 gramos del asfalto "B PG 64-22", estas masas simulan la concentración de asfalto que se tiene cuando se recupera el asfalto del RAP. La cantidad de asfalto empleado para el proceso de extracción en alambique fue determinada por la ecuación 3.1. De la misma forma que el apartado anterior, se tomó un rango amplio, esto porque en una mezcla no se sabe con certeza el porcentaje de asfalto empleado; estas se diluyeron en 500 ml de tricloroetileno y posteriormente fueron destilados con ayuda del alambique a temperaturas de entre 230 y 260 °C. El procedimiento completo se describe en la Tabla 3.3.

Para medir el grado de envejecimiento, el residuo obtenido se evaluó en el DSR en condición original y posteriormente los valores fueron comparados con los resultados del asfalto identificado como B PG 64-22.

Tabla 3. 3. Proceso de extracción con el Alambique

Descripción	
1. Se colocaron los termómetros en la tapa del alambique con su correspondiente tapón de corcho ajustado y sujetándolos de tal manera que el bulbo de uno de ellos quedó a 6 mm del fondo del alambique y el del otro quedó aproximadamente a 165 mm de dicho fondo	
2. Se conectó el alambique con el refrigerante y se colocó el quemador anular de gas a 15 cm de su fondo para, posteriormente, encender el quemador.	
3. Cuando se observó que no hubo más condensación se bajó el quemador anular al nivel de fondo del alambique, manteniendo esta condición por 15 min. La prueba duró alrededor de 30 min. y la temperatura osciló entre 230 y 260 °C.	
4. Se recuperó el asfalto del alambique para continuar con la evaluación.	

3.1.1.1 Validación para un asfalto modificado

Como parte de la metodología, el método de extracción con rotavapor y alambique se validaron con el asfalto "B PG 70-22".

El proceso se llevó a cabo, como se describen en las tablas 3.2 y 3.3 para rotavapor y alambique respectivamente. Con el propósito de observar si el comportamiento con asfaltos modificados es diferente, ya que se le agrega la variable de un polímero, los residuos de asfalto obtenidos con ambos métodos, se evaluaron con

ayuda del Reómetro de Corte Dinámico en condición original y comparados con los valores de B PG 70-22.

3.1.2 Validación de las calibraciones con Mezcla asfáltica

El objetivo del uso de mezcla asfáltica en esta etapa fue simular el proceso de extracción del RAP. En esta fase se emplearon dos tipos de mezcla: una elaborada en planta y otra en laboratorio. Ambas se calentaron a 130°C para poder ser disgregadas y poder tomar 1 kg de muestra.

Con ayuda de un equipo de centrifugado (rotarex) y el tricloroetileno, se extrajo el asfalto de la mezcla, teniendo como resultado: asfalto + tricloroetileno. Para recuperar el asfalto del tricloroetileno, se utilizaron los equipos de Rotavapor y Alambique.

A) Mezcla asfáltica en laboratorio

La mezcla asfáltica de laboratorio se fabricó con los dos tipos de asfaltos, el PG 64-22 y el PG 70-22, caracterizados por la metodología Superpave (apartado 3.1.1.1). Las mezclas se elaboraron a una temperatura de mezclado de 160 °C y a una temperatura de compactación de 150 °C. Para extraer el asfalto del agregado se continuó como se describe en el apartado 3.1.2.3 (proceso de extracción en Rotarex) y para recuperar el asfalto del solvente se procedió acorde al apartado 3.1.2.4 (Recuperación en Rotavapor) y 3.1.2.5 (Recuperación en Alambique).

B) Mezcla asfáltica de planta

Para la elaboración mezcla de planta se empleó el asfalto PG 76-22, el cual fue caracterizado por la metodología Superpave como se hizo en el apartado 3.1.1.1. El material pétreo empleado provenía del banco de material TRICOVSA, y la mezcla asfáltica fue elaborada por la empresa ESMA Ingeniería. Para extraer el asfalto del agregado se continuó como se enuncia en el apartado 3.1.2.3 (proceso de extracción en Rotarex) y para recuperar el asfalto del solvente se siguió el

procedimiento descrito en el apartado 3.1.2.4 (Recuperación en Rotavapor) y 3.1.2.5 (Recuperación en Alambique).

3.1.2.1 Proceso de extracción en Rotarex

Para separar el agregado pétreo y el asfalto, se siguió la normativa ASTM D2172-17. Se sometió la mezcla a un proceso de separación del asfalto y agregado (Figura 3.1), el cual consistió en colocar 1000 g de Mezcla asfáltica en el Rotarex, posteriormente se cubrió con tricloroetileno, se tapó el equipo y se dejó reposar por 40 min. Pasado ese tiempo, se hizo girar a 3600 rpm hasta que el disolvente dejó de fluir por el desagüe.



Figura 3.5 Proceso de extracción en el Rotarex (a) Mezcla asfáltica (b) Tricloroetileno (c) Rotarex (d) Agregado después de recuperación en el Rotarex (e) Asfalto + tricloroetileno – obtenido en la recuperación con Rotarex

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 Recuperación en Rotavapor

Una vez que se separó el asfalto del agregado, se obtuvo asfalto + tricloroetileno del cual se tomó una porción 500 g, posteriormente se destiló con ayuda del rotavapor y se siguió el proceso determinado en el apartado 3.1.1.2.

Los residuos obtenidos en los diferentes procesos fueron evaluados mediante los procedimientos:

- DSR después de RTFO
- MSCR

3.1.2.3 Recuperación en Alambique

Ya que se obtuvo el asfalto + tricloroetileno, se tomó una porción 1000 g que posteriormente se destiló con ayuda del alambique y se siguió el proceso determinado en el apartado 3.1.1.3.

Los residuos obtenidos en los diferentes procesos fueron evaluados mediante las pruebas:

- DSR después de RTFO
- MSCR

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

3.2 Reciclado en frío

Este apartado se dividió en dos partes: la correspondiente en **extracción en rotavapor** y la **extracción en alambique**.

3.2.1 Caracterización por Grado PG

Los asfaltos, se caracterizaron de acuerdo con la metodología Superpave Grado PG (ASTM D6373), que incluye los siguientes ensayos:

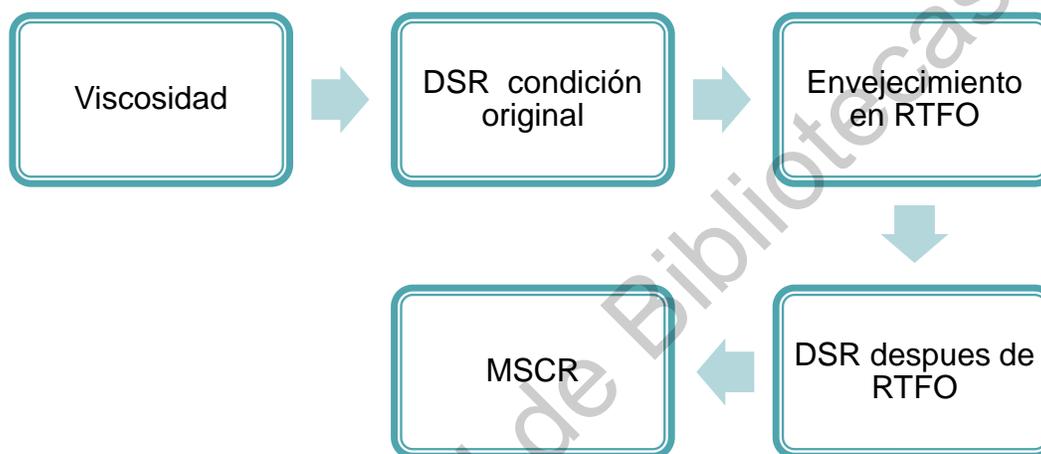


Figura 3. 6 Ensayos para los valores de referencia para Reciclado en frío

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Extracción en Rotavapor

Para este proceso se realizaron diferentes pruebas variando la temperatura de 90 a 110 °C, para establecer un procedimiento en donde no se tenga dificultades en la extracción.

Para las temperaturas de 90 a 100 °C, el proceso de extracción se alargaba a 3 h. Se destaca que la aplicación de vacío no es recomendable hasta después de evaporarse el agua, ya que si se aplica antes comienza a espumar y sucede lo que se muestra en la figura 3.4



Figura 3.7 Mala aplicación de vacío en una muestra de emulsión –
Fuente: Elaboración propia

Se determinó el proceso, el cuál consistió en calentar el baño de aceite a 110 °C. En el matraz con capacidad 3000 ml se colocó 200 g de emulsión asfáltica (es importante tomar en cuenta esta condición porque si se emplea un matraz de menor capacidad el ensayo no funcionará, se ensambló el equipo y se sumergió el matraz de tal forma que cubriera una cuarta parte y se hizo girar a 20 rpm, se acondicionó por 20 min, posteriormente Se aplicó un vacío inicial de 5.3 KPa (si comienza a espumar se quita la presión), cuando no se observó más condensación se aumentó la vacío a 80 kPa, esta condición se mantuvo por 15 min.

3.2.3 Extracción en Alambique

Para la extracción del alambique se siguió el procedimiento marcado en la norma ASTM D6997-12. Mediante la destilación se separa el agua del asfalto. Si el material contiene destilado del petróleo, éste será separado junto con el agua.

En la destilación de emulsiones asfálticas se emplea un alambique de aleación de aluminio y quemadores de anillo. Normalmente, se realiza la destilación a una temperatura de 260 °C durante 15 min. Debido a que la emulsión en la obra rara vez alcanza dicha temperatura, vale señalar que ciertas propiedades del residuo pueden ser alteradas.

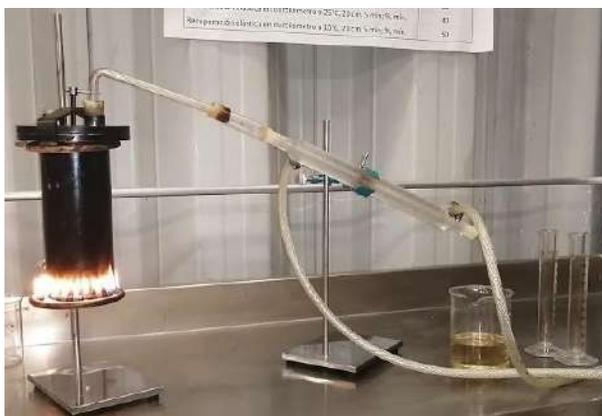


Figura 3. 8 Equipo de destilación en alambique

Fuente: Elaboración propia

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calibración de los procesos de Recuperación

En este capítulo se mostrarán los resultados de la calibración que se hizo para el proceso de recuperación con el método del Rotavapor y el Alambique.

4.1.1 Caracterización por Grado PG

En la Tabla 4.1 se observan los valores para la clasificación del Grado PG de los dos asfaltos empleados para la calibración. Estos datos serán tomados como base, para los apartados posteriores.

Tabla 4. 1. Resultados del Grado PG de asfaltos bases

Condición	Temperatura (°)	Parámetro	Base PG 64-22	Base PG 70-22
Viscosidad	135	Pa•s	0.414	0.644
DSR ORIGINAL	64	G* (Kpa)	1.535	2.4095
		δ (°)	86.56	76.75
		G*/SEN δ (kPa)	1.538	2.4755
	70	G* (Kpa)	0.73	1.2485
		δ (°)	87.61	77.855
		G*/SEN δ (kPa)	0.731	1.277
	76	G* (Kpa)	0.371	0.6625
		δ (°)	88.32	79.31
		G*/SEN δ (kPa)	0.371	0.6745
RTFO	CM	%	-0.179	-0.144
DSR RTFO	64	G* (Kpa)	3.5735	5.2945
		δ (°)	83.34	72.89
		G*/SEN δ (kPa)	3.5975	5.5395
	70	G* (Kpa)	1.654	2.705
		δ (°)	85.18	73.945
		G*/SEN δ (kPa)	1.654	2.8145
	76	G* (Kpa)	0.7885	1.4135
		δ (°)	86.665	75.41
		G*/SEN δ (kPa)	0.79	1.4605
MSCR	64	R _{3.2} (%)	-0.19	
		J _{nr3.2} (kPa ⁻¹)	6.50	
	70	R _{3.2} (%)	-	4.47
		J _{nr3.2} (kPa ⁻¹)	-	36.06

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Extracción en rotavapor

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para determinar el proceso de extracción del método de Rotavapor con un asfalto sin modificar (PG 64-22) y modificado PG 70-22

4.1.2.1 Asfalto PG 64-22

- **DSR en condición original**

Los residuos asfálticos obtenidos en el proceso de destilación en rotavapor se evaluaron en el DSR, siguiendo la normativa de la ASTM D7175, siendo que para cada condición se analizaron dos muestras (M1 y M2) y cada muestra se evaluó por duplicado (M1R1, M1R2, M2R1, M2R2)

Se analizó la variación de tres parámetros, el módulo de corte (G^*), el ángulo de fase (δ) y la relación $G^*/\text{sen } \delta$ a la temperatura de 64 °C.

- **Asfalto PG 62-22, 10g**

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos, los cuales están por debajo de los valores de la muestra B PG 64-22 empleada como base, esto indica que el solvente no se retiró completamente. Las muestras se ensayaron en las mismas condiciones, excepto M2R2, porque antes de poder fabricar la pastilla, la muestra se enfrió, por lo tanto, se sometió a un segundo calentamiento (hasta que obtuvo fluidez), por tal motivo los resultados entre replicas son diferentes. Con M2R1, se respetó el procedimiento, esto demuestra que aún contenía disolvente, mientras que para M2R2 al sufrir un recalentamiento, el disolvente terminó de evaporarse en este proceso.

Tabla 4.2. PG 64-22-10 gramos – DSR Original-Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen δ (kPa)
-	B PG 64-22	64	1.535	86.56	1.538
110	M1R1	64	1.177	85.57	1.181
110	M1R2	64	1.759	84.89	1.766
110	M2R1	64	0.705	86.60	0.706
110	M2R2	64	1.324	85.28	1.329
140	M1R1	64	1.278	85.89	1.282
140	M1R2	64	1.391	85.62	1.395
140	M2R1	64	1.238	85.66	1.342
140	M2 R2	64	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la variación porcentual con respecto al asfalto base (B PG 64-22), mostrados en la Tabla 4.3. En el valor de G*, la variación más grande se encuentra a la temperatura de 110°C (54.7%), mientras que la menor variación es a la temperatura de 140°C (9.38%). La misma condición se presenta para el ángulo de fase (δ), en donde la mayor dispersión se encuentra a una temperatura de 110°C; al combinar los parámetros en la relación G*/sen δ, se observa que no se cumple con la repetibilidad establecida en el método de ensayo, la norma ASTM D7175, establece que un rango aceptable entre dos resultados echo por la misma persona en la prueba del DSR en condición original (d2s %) debe ser menor a 6.4%. Tomando en cuenta esto, ningún resultado se encuentra en el rango aceptable de variación.

Es evidente que cuando se realiza la recuperación a una temperatura de 110°C, los resultados son muy dispersos, al aumentar la temperatura se reduce la dispersión. Se destaca que la M2R2 a la temperatura de 140 °C no presenta resultados debido a que el residuo obtenido de la muestra de 10 g no fue suficiente para fabricar dos pastillas para la prueba del DSR.

Tabla 4.3. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 10 gramos – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/senδ (%)
-	B PG 64-22	64	0	0	0
110	M1R1	64	23.32	1.14	23.21
110	M1R2	64	-14.59	1.93	-14.82
110	M2R1	64	54.07	-0.05	54.08
110	M2R2	64	13.75	1.48	13.59
140	M1R1	64	16.74	0.77	16.64
140	M1R2	64	9.38	1.09	9.30
140	M2R1	64	12.83	1.04	12.74
140	M2 R2	64	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

- **Asfalto PG 62-22, 30g**

Los resultados de la evaluación a una concentración de 30 g se presentan en la Tabla 4.4 y la variación porcentual se muestra en la Tabla 4.5.

Para el parámetro G*, las muestras M1R1, M2R1, M2R2, a la temperatura de 110°C, muestran valores bajos (0.65 kPa, 0.416 kPa, 0.552 kPa, respectivamente) lo que indica ablandamiento porque no se retiró por completo el solvente, esto se comprueba en la Tabla 4.5, donde las mismas muestras presentan las mayores dispersiones (57.65%, 72.86%, 64%). La misma condición se presenta con el parámetro G*/sen δ. Los ángulos de fase son más altos, esto también es un indicador de que los resultados están afectados por el solvente utilizado.

Tabla 4.4. PG 64-22 a 30 gramos – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)	Repetibilidad (%)
-	B PG 64-22	64	1.535	86.56	1.538	
110	M1R1	64	0.650	86.77	0.651	≤6.4
110	M1R2	64	1.347	85.40	1.352	≤6.4
110	M2R1	64	0.416	87.33	0.417	≤6.4
110	M2R2	64	0.552	87.06	0.5534	≤6.4
140	M1R1	64	1.344	84.77	1.350	≤6.4
140	M1R2	64	1.389	85.09	1.389	≤6.4
140	M2R1	64	1.592	84.90	1.598	≤6.4
140	M2 R2	64	1.527	84.84	1.533	≤6.4

Fuente: Elaboración propia

Al realizar la recuperación del asfalto a la temperatura de 140°C, la variación porcentual se redujo notablemente, sin embargo, dos muestras de las cuatro (M1R1, M1R2) evaluadas no cumplen con la repetibilidad establecida. Considerando la menor dispersión de los resultados, se determinó que la mejor condición para realizar la recuperación en Rotavapor, es utilizando 30 g de asfalto a una temperatura de 140°C.

Tabla 4.5. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 30 gramos – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/senδ (%)	Repetibilidad (%)
-	B PG 64-22	64	0	0	0	
110	M1R1	64	57.65	-0.24	57.63	≤6.4
110	M1R2	64	12.25	1.34	12.09	≤6.4
110	M2R1	64	72.86	-0.89	72.89	≤6.4
110	M2R2	64	64.00	-0.58	64.02	≤6.4
140	M1R1	64	12.44	2.07	12.22	≤6.4
140	M1R2	64	9.51	1.70	9.69	≤6.4
140	M2R1	64	-3.71	1.92	3.90	≤6.4
140	M2 R2	64	0.52	1.99	0.33	≤6.4

Fuente: Elaboración propia

- **Deformación permanente**

Adicional a la evaluación del DSR en condición original, se evaluó la deformación permanente de acuerdo a la normativa ASTM D7405 – 15. Cabe destacar, que la normativa determina que la evaluación se debe realizar con asfalto producto de RTFO, pero para fines de investigación se realizó en condición original. En la Figura 4.1 se muestra el comportamiento del asfalto base (B PG 64-22) y de las muestras obtenidas en el Rotavapor determinados por la prueba MSCR, en donde las muestras de 10 g presentan mayor deformación comparadas con las de 30 g. Sin embargo, estas aún son mayores que las del asfalto base. La Tabla 4.6 presenta los datos del porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r3.2}$) del ciclo 30 obtenido de la prueba del MSCR, calculado según la norma ASTM D7405-15; con esto se procedió

al cálculo del porcentaje de variación con respecto al asfalto base (B PG 64-22), donde las muestras de 10 g presentan valores hasta de 62.03% y 73.49%, mientras que las muestras de 30 g indican variaciones porcentuales de 46.40% y 42.64%. A pesar de que la variación disminuyó, el disolvente (tricloroetileno) afectó las propiedades del asfalto a deformación permanente (Tabla 4.6), sin embargo, esto no puede ser observado en la evaluación de sus propiedades viscoelásticas lineales (Tabla 4.4). Para fines de evaluación del procedimiento de recuperación se recomienda analizar el asfalto en un rango viscoelástico lineal.

Tabla 4. 6 Variación entre muestras - B PG 64-22 – MSCR - Rotavapor

	Cantidad (g)	Ciclo	$\epsilon_{r 3.2}$	% de Variación
B PG64-22		30	220.026	
M1R1	10	30	356.503	62.03
M2R1	10	30	381.730	73.49
M1R1	30	30	322.118	46.40
M2R1	30	30	313.853	42.64

Fuente: Elaboración propia

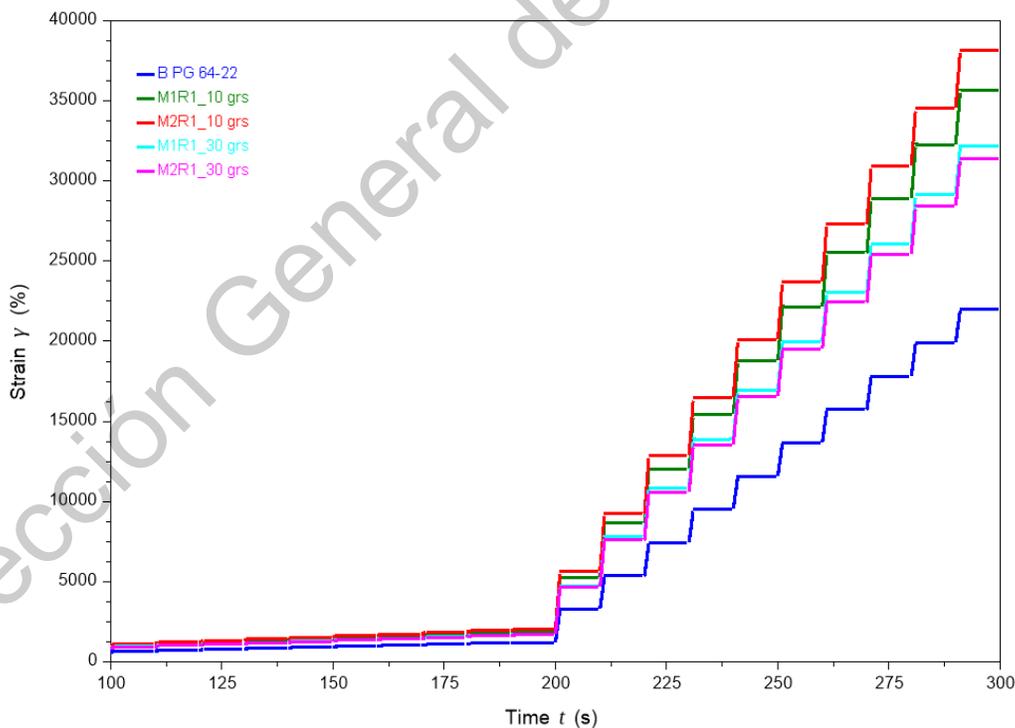


Figura 4. 1. Resultados de MSCR (PG 64-22) - Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2 Asfalto PG 70-22

- **DSR en condición Original**

Una vez determinada la temperatura de ensayo (140°C), se inició la segunda etapa de evaluación, la cual consistió en verificar si la condición establecida es válida para cualquier tipo de asfalto. Para esto, se realizó el mismo protocolo de extracción a una temperatura de 140 °C en un asfalto el cual fue clasificado como un PG 70-22. La Tabla 4.7 muestra los resultados del DSR en condición original del asfalto a 70°C, se observa que los resultados de la muestra M1R1 de 10 g se encuentran por debajo del asfalto base (B PG 70-22); esto se comprueba en la tabla 4.8, para el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ la variación porcentual es de 34.22%, y no se pudo determinar el resultado en M2R1, porque el residuo de la muestra de 10 g no fue suficiente para fabricar la pastilla.

Tabla 4.7. PG 70-22- 10 y 30 gramos– DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen δ (kPa)
-	B PG 70-22	-	70	1.249	77.855	1.277
140	M1R1	10	70	0.822	78.00	0.840
140	M2R1	10	70	-	-	-
140	M1R1	30	70	1.256	78.15	1.283
140	M2R1	30	70	1.286	78.13	1.315

Fuente: Elaboración propia

En lo referente a la repetibilidad con respecto al asfalto base (B PG 70-22), la muestra de 10 g no cumplió con este parámetro (Tabla 4.8), mientras que las muestras de 30 g están dentro de los valores permisibles, por lo cual, si se toma en cuenta las propiedades viscoelásticas, se considera que el protocolo de evaluación es adecuado para muestras de 30 g y el proceso de extracción a 140°C permite recuperar el asfalto sin afectar estas propiedades, ya sea por los residuos de solvente restantes en el asfalto o por un envejecimiento excesivo durante la extracción.

Tabla 4.8. Variación entre muestras - B PG 70-22 – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/sen δ (%)	Repetibilidad (%)
-	B PG 70-22	-	70	0	0	0	-
140	M1R1	10	70	34.16	0.19	34.22	≤6.4
140	M2R1	10	70	-	-	-	≤6.4
140	M1R1	30	70	1.35	0.47	1.19	≤6.4
140	M2R1	30	70	1.27	0.50	1.39	≤6.4

Fuente: Elaboración propia

- **Deformación permanente**

En la Tabla 4.9 se observa el porcentaje de variación entre muestras del último ciclo de la prueba del MSCR, con respecto al asfalto base (B PG 70-22), donde las muestras de 10 g presentan un porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r 3.2}$) de 92.11% y 79.76%.

Tabla 4.9. Variación entre muestras - B PG 70-22 – MSCR - Rotavapor

Muestra	Cantidad (g)	Ciclo	$\epsilon_{r 3.2}$	% de Variación
B PG70-22	-	30	216.343	
M1R1	10	30	415.612	-92.11%
M2R1	10	30	388.892	-79.76%
M1R1	30	30	323.696	-49.62%
M2R1	30	30	325.187	-50.31%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se presenta el comportamiento del asfalto base (B PG 70-22) y de las muestras obtenidas por la prueba del MSCR, se comprueba que las muestras de 10 g indican una mayor deformación comparadas con las de 30 g, inclusive estas últimas muestran comportamientos iguales entre muestras (M1R1, M2R1), sin embargo, se encuentran con 49.62 y 50.31% arriba del asfalto base (B PG 70-22), lo que indica un ablandamiento en el asfalto. Nuevamente, se tiene un comportamiento similar a la etapa 1, en donde el disolvente (tricloroetileno) afecta las propiedades del asfalto modificado a deformación permanente (Tabla 4.9) y no puede ser observado en la evaluación de sus propiedades viscoelásticas lineales (Tabla 4.7).

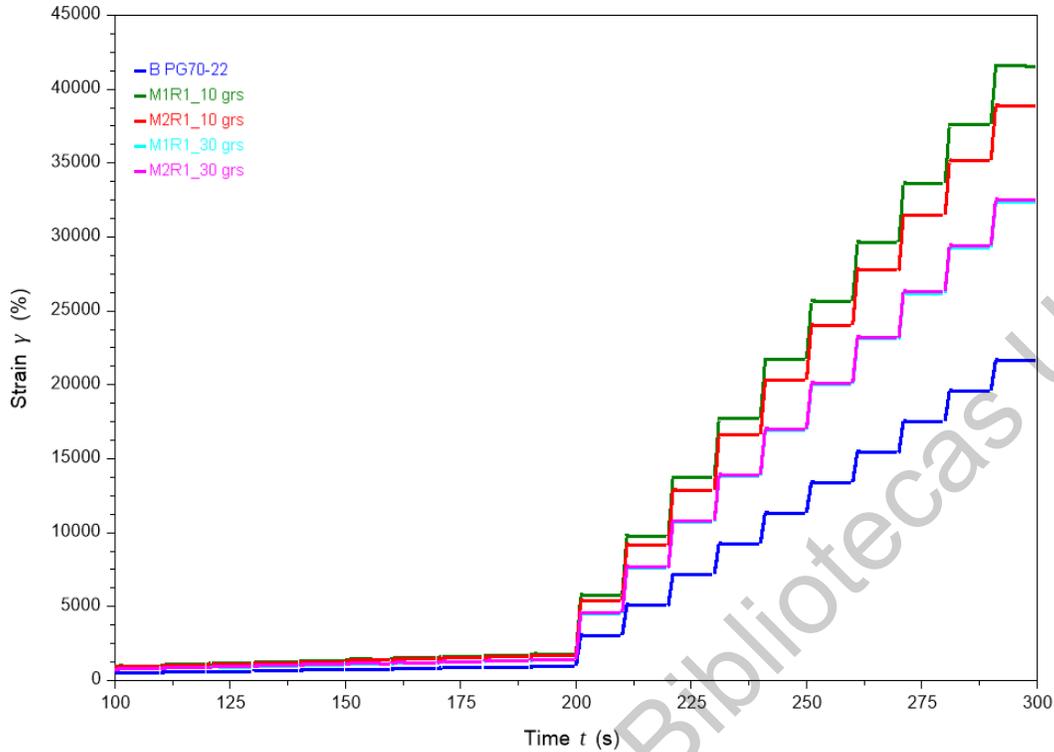


Figura 4. 2. Resultados de MSCR (PG 70-22) - Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Extracción en alambique

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para determinar el proceso de recuperación con el método del alambique con asfalto sin modificar clasificado como PG 64-22 y modificado PG 70-22.

Los residuos asfálticos obtenidos en el proceso de destilación en Alambique se evaluaron en el DSR siguiendo la normativa de la ASTM D7175 para las propiedades viscoelásticas lineales, en el caso de la prueba del MSCR (Deformación permanente) se siguió la norma ASTM D7405-15. Para cada condición se analizó una muestra (M1) por duplicado (M1R1, M1R2)

4.1.3.1 Asfalto PG 64-22

La evaluación se realizó con el asfalto base PG 64-22. Se analizó la variación de tres parámetros, el módulo de corte (G^*), el ángulo de fase (δ) y la relación $G^*/\sin \delta$ a la temperatura de 64 °C. La tabla 4.10 muestra los resultados obtenidos, los

cuales están por arriba de los valores de la muestra B PG 64-22 empleada como base, esto indica oxidación en el asfalto. Las muestras se ensayaron en las mismas condiciones.

Tabla 4. 10. PG 64-22- 10 y 30 gramos– DSR Original-Alambique

Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/Sen δ (kPa)
B PG 64-22	-	64	1.535	86.56	1.538
M1R1	10	64	2.93	83.4	2.95
M1R2	10	64	2.91	83.4	2.93
M1R1	30	64	3.66	82.3	3.69
M1R2	30	64	3.77	82.3	3.80

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.11 muestra la variación porcentual con respecto a los valores empleados como base (B PG 64-22), en el caso de los resultados obtenidos de la muestra de 10 g se observan valores hasta del 91.81%, y para las muestras de 30 g hasta de 147.07%, se destaca que estos valores se encuentran por encima de la repetibilidad establecida.

Tabla 4. 11 Variación entre muestras – B PG 64-22 – DSR Original – Alambique

Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/Sen δ (%)	Repetibilidad (%)
B PG 64-22	-	64	0	0	0	-
M1R1	10	64	-90.88	3.65	-91.81	≤6.4
M1R2	10	64	-89.58	3.65	-90.51	≤6.4
M1R1	30	64	-138.44	4.92	-139.92	≤6.4
M1R2	30	64	-145.60	5.04	-147.07	≤6.4

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.12 presenta los datos del porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r 3.2}$) del ciclo 30 obtenido de la prueba del MSCR, calculado según la norma ASTM D7405-15; con esto se procedió al cálculo del porcentaje de variación con respecto al asfalto base (B PG 64-22), donde las muestras de 10 g presentan valores de 51% y 118%, mientras que las muestras de 30 g indican variaciones porcentuales de 118% y 162%.

Tabla 4. 12 Variación entre muestras – B PG 64-22 – MSCR – Alambique

Muestra	Cantidad (g)	Ciclo	Er	% de Variación
B PG64-22	-	30	220.26	
M1R1	10	30	108.996	51%
M2R2	10	30	115.722	96%
M1R1	30	30	83.263	118%
M2R1	30	30	85.6262	162%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.3, se observa el comportamiento de cada muestra. Aquellas que pasaron por el proceso de recuperación en alambique mejoraron su comportamiento a deformación permanente con respecto al resultado del asfalto usado como base (B PG 64-22). Sin embargo, se busca la mejor aproximación entre el de B PG 64-22 y de las muestras recuperadas en alambique.

Por un lado, se manejan temperaturas arriba de 200 °C, por el otro se tiene el efecto del solvente sobre el asfalto, estas variables afectaron las propiedades del asfalto a deformación permanente (Tabla 4.12).

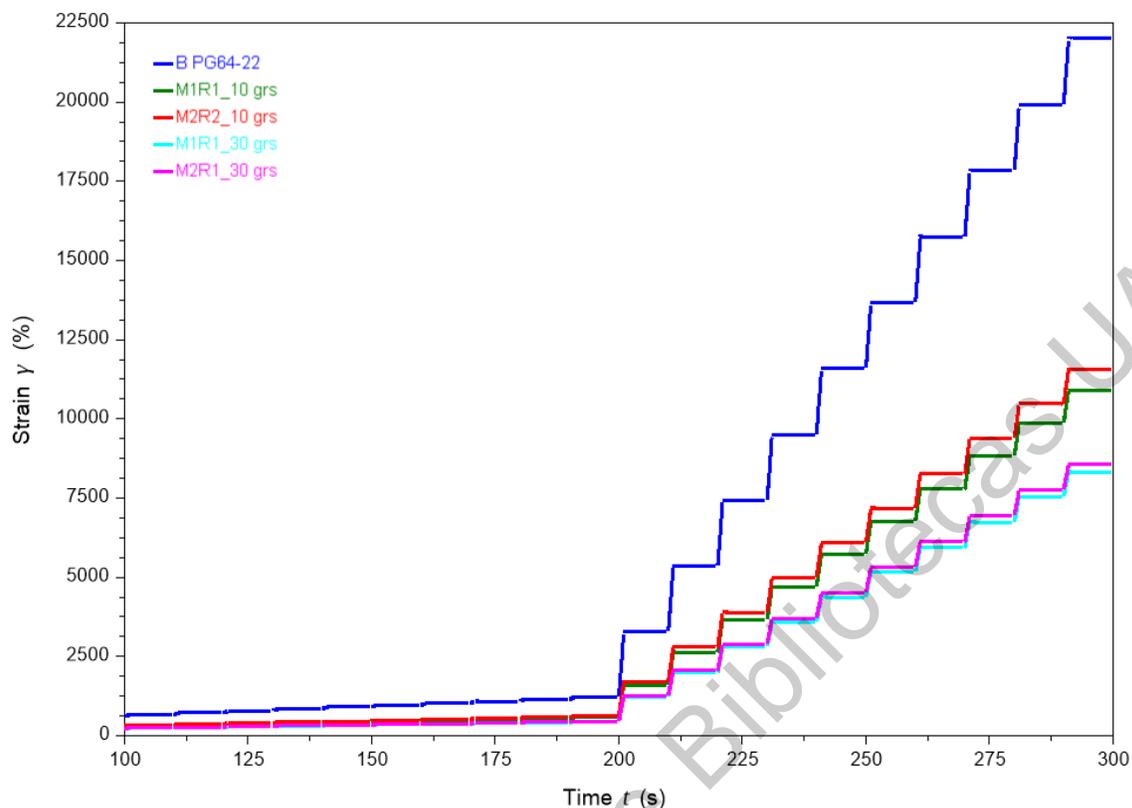


Figura 4. 3 Resultados de MSCR (PG 64-22) – Alambique

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2 Asfalto PG 70-22

La evaluación se realizó con el asfalto modificado clasificado como PG 70-22, La evaluación se realizó con el asfalto base PG 64-22. Se analizó tres parámetros, el módulo de corte (G^*), el ángulo de fase (δ) y la relación $G^*/\text{sen } \delta$ a la temperatura de 70 °C, estos resultados se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4. 13. PG 70-22- 10 y 30 gramos– DSR Original-Alambique

Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*/\text{Sen}\delta$ (kPa)
B PG 70-22	-	70	1.248	77.855	1.277
M1R1	10	70	1.60	83.00	1.62
M1R2	10	70	1.56	83.00	1.57
M1R1	30	70	1.07	84.10	1.07
M1R2	30	70	1.08	84.00	1.08

Fuente: Elaboración propia

Se analizó la variación porcentual con respecto a los valores empleados como base (B PG 70-22), para el caso de las muestras obtenidas de 10 g se tienen valores de 26.86 y 22.94%, mientras que las de 30 g muestran 16.21 y 15.43% de variación por debajo de los valores base. A pesar de que estas últimas mostraron variaciones menores que la de 10 g, no cumplieron con la repetibilidad establecida ($\leq 6.4\%$), lo cual indicaría oxidación en el asfalto.

Tabla 4. 14 Variación entre muestras – B PG 70-22 – DSR Original – Alambique

Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/Sen δ (%)	Repetibilidad (%)
B PG 70-22	-	64	0	0	0	-
M1R1	10	64	-28.15	-6.61	-26.86	≤ 6.4
M1R2	10	64	-24.95	-6.61	-22.94	≤ 6.4
M1R1	30	64	14.30	-8.02	16.21	≤ 6.4
M1R2	30	64	13.50	-7.89	15.43	≤ 6.4

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.14 presenta los datos del porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r 3.2}$) del ciclo 30 obtenido de la prueba del MSCR, calculado según la norma ASTM D7405-15; con esto se procedió al cálculo del porcentaje de variación con respecto al asfalto base (B PG 70-22), donde las muestras de 10 g presentan valores de 6.28 % y 5.18%, mientras que las muestras de 30 g indican variaciones porcentuales de 48.43 y 24.27%.

Tabla 4. 15 Variación entre muestras - B PG 70-22 – MSCR – Alambique

Muestra	Cantidad (g)	Ciclo	Er	% de Variación
B PG 70-22		30	216.343	
M1R1	10	30	229.930	-6.28
M2R1	10	30	232.161	-5.18
M1R1	30	30	332.689	-48.43
M2R1	30	30	301.002	-24.27

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.4 se comprueba el resultado de la tabla 4.14, donde las muestras de 30 g muestran mayor deformación, mientras que el comportamiento de las de 10 g es similar a la base B PG 70-22.

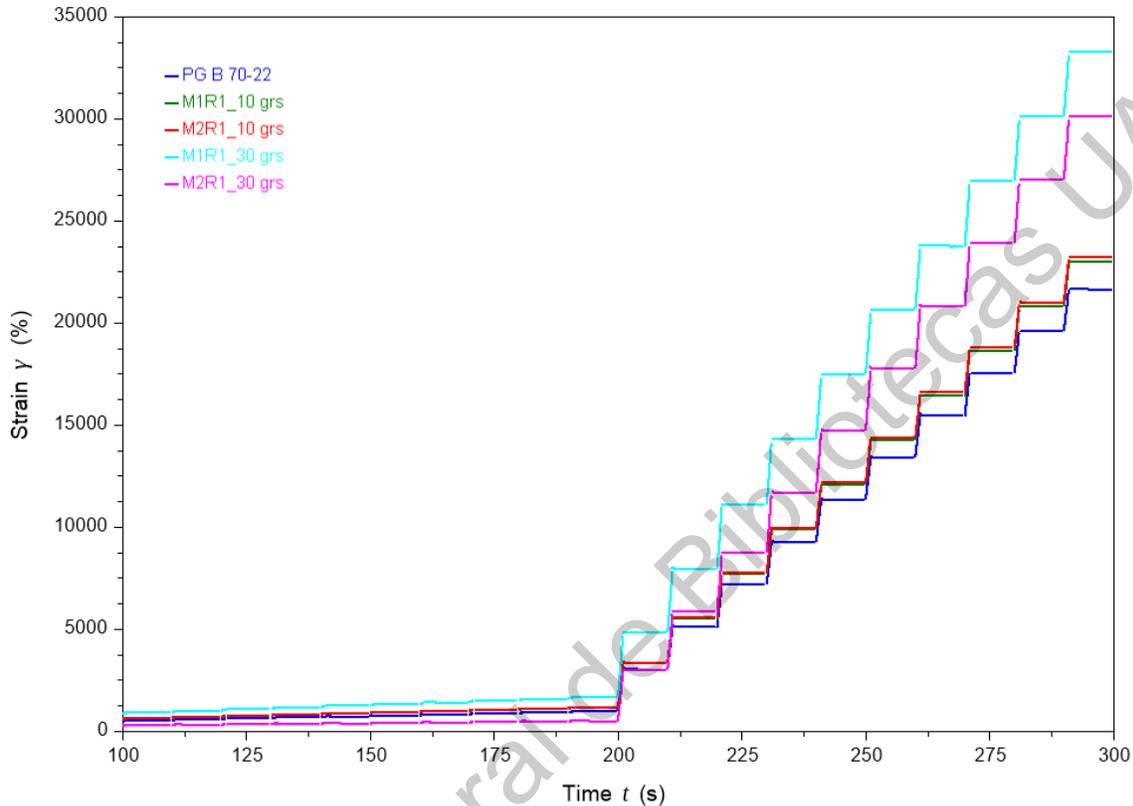


Figura 4. 4 Resultados de MSCR (PG 70-22) – Alambique

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Discusión

En la calibración realizada se determinó que la **temperatura óptima de extracción en el Rotavapor es a 140°C**, ya que a esta temperatura se obtiene valores del rango viscoelástico lineal dentro de la repetibilidad establecida, tanto en un asfalto asfáltico convencional como en un asfalto modificado.

En el caso del **método del alambique**, se manejan temperaturas que oscilan entre 200 y 260°C, al encontrarse con el fuego directo esta no puede ser controlada, lo que **influye en la oxidación del** asfalto, por tal razón los resultados viscoelásticos

lineales en ambos asfaltos (PG 64-22 y PG 70-22) son mayores a los valores empleados como base.

La deformación permanente no muestra alguna relación con las propiedades viscoelásticas lineales: Por un lado, para el asfalto sin modificar (PG 64-22) y extraído con el método de rotavapor se tiene variaciones de 42.64%, sin embargo, este aún es alto. Por otro lado, para el asfalto modificado PG 70-22, la muestra de 10 g obtenido de la recuperación en Alambique, mostró variaciones bajas (6.28 % y 5.18%), lo que no sucede con el Rotavapor. Se recomienda pruebas químicas para observar la influencia del solvente en el asfalto.

Dirección General de Bibliotecas UHQ

4.2 Mezcla asfáltica

Para determinar los valores viscoelásticos lineales, los residuos asfálticos obtenidos en la recuperación, fueron evaluados en el reómetro de corte dinámico, se considera que la mezcla ha pasado por un proceso de mezclado y compactación, que es lo que se simula en el proceso de envejecimiento en RTFO, por lo tanto, fue evaluado en estas condiciones tomando en cuenta el parámetro de cumplimiento del $G^*/\sin(\delta) \geq 2.2$ kPa. Mientras que para medir la deformación permanente se siguió la norma ASTM D7405-15.

4.2.1 Extracción en Rotavapor

Se muestran los resultados obtenidos de la extracción del asfalto con el método de Rotavapor. Se emplearon dos tipos de materiales: Mezcla asfáltica elaborada en laboratorio y mezcla asfáltica elaborada en planta.

4.2.1.1 *Mezcla asfáltica de laboratorio*

La Tabla 4.16, muestra los resultados en condición DSR - RTFO de los dos asfaltos empleados en la elaboración de las mezclas asfálticas, los cuales se encuentran por debajo de los valores empleados como referencia (MA PG 64-22 y MA PG 70-22); el proceso de mezclado y compactación en laboratorio produce un envejecimiento inferior al que genera el equipo RTFO, el cual está más asociado al envejecimiento en planta.

Tabla 4. 16. Resultados de muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)
-	MA PG 64-22	64	3.573	80.34	3.597
110	M1R1	64	2.574	83.18	2.592
110	M1R2	64	2.811	83.06	2.832
140	M1R1	64	2.575	83.62	2.591
140	M1R2	64	2.525	83.69	2.541
-	MA PG 70-22	70	2.705	73.945	2.814
110	M1R1	70	1.368	78.595	1.396
110	M1R2	70	1.423	78.675	1.451
140	M1R1	70	2.168	77.195	2.224
140	M1R2	70	2.435	77.375	2.495

Fuente: Elaboración propia

En los resultados mostrados en la Tabla 4.17 de los asfaltos producto de la mezcla asfáltica, se observa que en un asfalto convencional (PG 64-22), la temperatura de extracción no tiene mayor influencia en los diferentes parámetros, sin embargo, esto no sucede con el asfalto modificado (PG 70-22), la variación entre resultados difiere según la temperatura empleada en la recuperación, para el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ a la temperatura de 110 °C se presenta hasta 50.40% de variación, mientras que a 140°C disminuye a 20.96%. Tomando en cuenta los valores del rango viscoelástico lineal, se confirma el proceso de recuperación a 140 °C.

Tabla 4. 17. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Rotavapor

T extracción (°)	Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/sen δ (%)	Repetibilidad (%)
-	MA PG 64-22	64	0	0	0	
110	M1R1	64	27.97	-0.19	27.95	≤ 9.00
110	M1R2	64	21.34	-0.34	21.28	≤ 9.00
140	M1R1	64	27.94	-0.34	27.97	≤ 9.00
140	M1R2	64	29.34	-0.42	29.37	≤ 9.00
-	MA PG 70-22	70	0	0	0	
110	M1R1	70	49.41	-6.29	50.40	≤ 9.00
110	M1R2	70	47.38	-6.40	48.43	≤ 9.00
140	M1R1	70	19.83	-4.40	20.96	≤ 9.00
140	M1R2	70	9.98	-4.64	11.35	≤ 9.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.18 se observa el porcentaje de variación entre muestras con respecto al asfalto base del último ciclo de la prueba del MSCR; las muestras pertenecientes al asfalto sin modificar, reflejan porcentajes de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r 3.2}$) de 10.32 % y 0.09%, contrario de lo que sucede en un asfalto modificado, en el cual presenta hasta un 234.44% de variación.

Tabla 4. 18. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – MSCR - Rotavapor

Muestra	Ciclo	$\epsilon_{r 3.2}$	% de Variación
MA PG64-22	30	91.77	
M1R1	30	101.239	-10.32%
M2R1	30	91.8543	-0.09%
MA B PG70-22	30	71.5566	
M1R1	30	239.316	-234.44%
M2R1	30	229.002	-220.03%

En la Figura 4.5 se presenta de manera gráfica el comportamiento de los asfaltos producto de la mezcla asfáltica; M1R1-PG64-22 y M2R1-PG64-22, indican un comportamiento similar al resultado base (MA PG64-22), contrario a lo que sucede con las muestras del asfalto modificado, en donde, la deformación es mayor.

Para tener claro este comportamiento se recomienda realizar pruebas químicas, para medir el efecto asociado al envejecimiento en el RTFO (se observó que este ensayo envejece más que un proceso de laboratorio) y comprobar si en un asfalto sin modificar, el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del asfalto modificado, probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO.

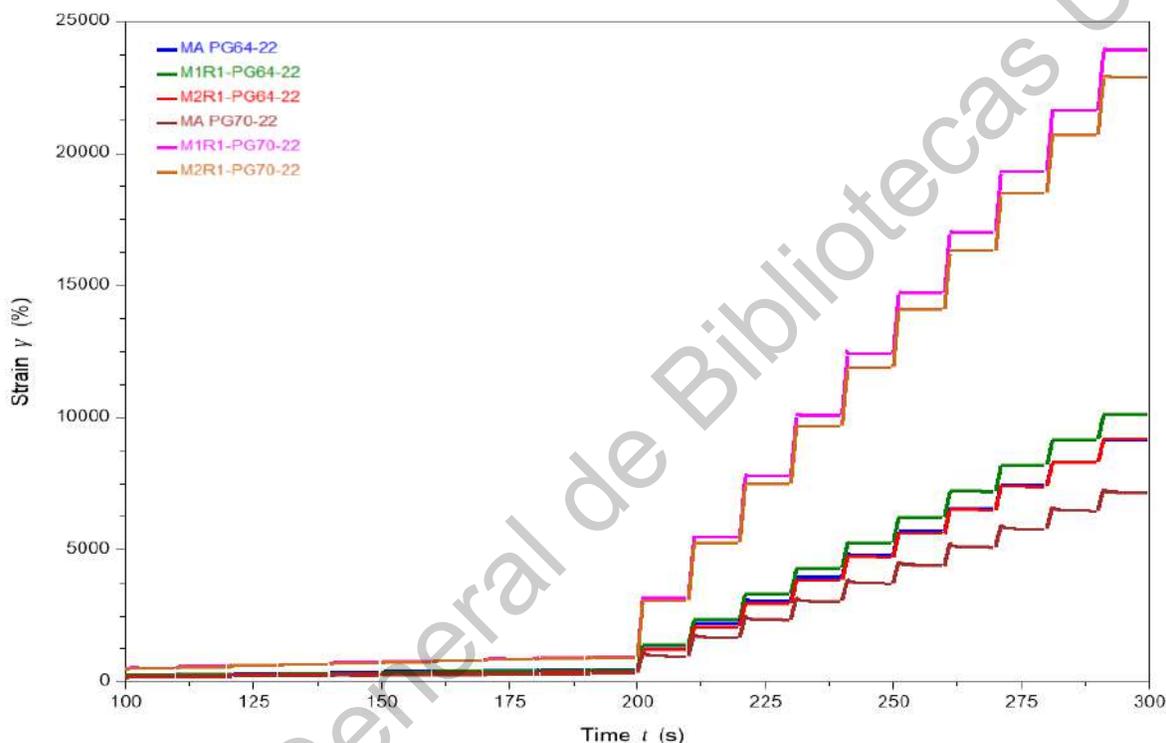


Figura 4. 5. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de laboratorio - Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2 Mezcla asfáltica de planta

En la Tabla 4.19 se observan los resultados del DSR en condición RTFO, de las diferentes muestras de asfalto obtenidos de la mezcla asfáltica.

En los parámetros G^* y $G^*/\sin \delta$, los resultados se encuentran por debajo del valor empleado como referencia (MA PG 76-22), mientras que para el ángulo de fase (δ)

sucede lo contrario estos valores incrementan, debido a que han perdido elasticidad consecuencia de la interacción con el solvente.

Tabla 4. 19. Resultados de muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)
-	MA PG 76-22	76	3.983	55.396	4.84
140	M1R1	76	2.07	67.80	2.24
140	M1R2	76	2.23	68.00	2.40
140	M2R1	76	1.99	69.10	2.13
140	M2R2	76	2.07	68.90	2.22

Fuente: Elaboración propia

La repetibilidad establecida por el método de ensayo debe ser mayor o igual al 9%, como se observa en la tabla 4.20, ninguna muestra cumple con este parámetro.

Tabla 4. 20. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (l%)	δ (%)	G*/senδ (%)	Repetibilidad (%)
-	MA PG 76-22	76	0	0	0	
140	M1R1	76	48.03	22.39	53.72	≤ 9.00
140	M1R2	76	44.01	22.75	50.41	≤ 9.00
140	M2R1	76	50.04	24.74	55.99	≤ 9.00
140	M2R2	76	48.03	24.38	54.13	≤ 9.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.21 se observa el porcentaje de variación entre muestras con respecto al asfalto base del último ciclo de la prueba del MSCR; en donde se tiene porcentajes de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r3.2}$) hasta de 336.22%.

Tabla 4. 21. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – MSCR - Rotavapor

Muestra	Ciclo	$\epsilon_{r3.2}$	% de Variación
MA PG 76-22	30	28.8662	
M1R1	30	118.992	312.22%
M1R2	30	125.920	336.22%
M2R1	30	112.571	289.98%
M2R1	30	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.6 se aprecia de forma gráfica la diferencia entre el comportamiento del asfalto empleado como base (MA PG 76-22) y los obtenidos de la recuperación en el Rotavapor

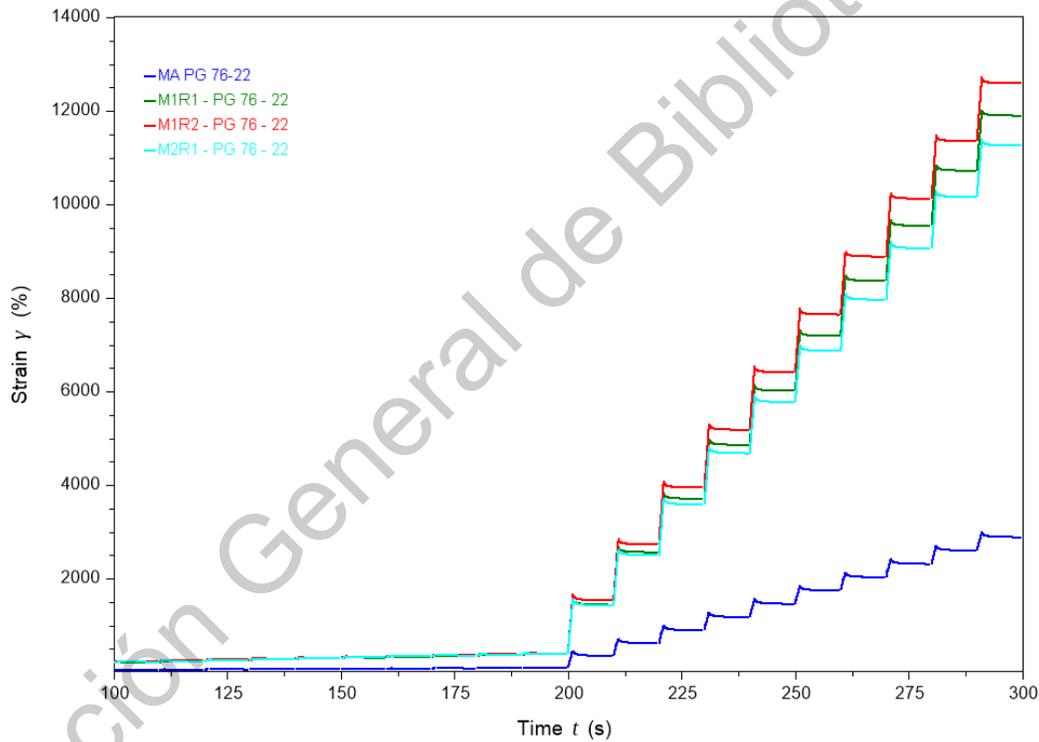


Figura 4. 6. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de planta - Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Extracción en alambique

Se muestran los resultados obtenidos de la extracción del asfalto con el método de Alambique. Se emplearon dos tipos de materiales: Mezcla asfáltica elaborada en laboratorio y mezcla asfáltica elaborada en planta.

4.2.2.1 Mezcla asfáltica de laboratorio

En la Tabla 4.22 se observan comportamientos diferentes, estos dependen del tipo de asfalto empleado en la mezcla asfáltica.

Tabla 4.22. Resultados de muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Alambique

Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen δ (kPa)
MA PG 64-22	64	3.573	80.34	3.597
M1R1	64	3.669	79.41	3.733
M1R2	64	3.617	79.48	3.678
M2R1	64	3.875	78.88	3.949
M2R2	64	3.848	78.87	3.922
MA PG 70-22	70	2.705	73.945	2.814
M1R1	70	2.235	76.79	2.295
M1R2	70	2.639	76.00	2.720
M2R1	70	2.130	78.10	2.180
M2R2	70	2.160	78.00	2.21

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las muestras con asfalto PG 64-22, indican que los valores se encuentran dentro de la repetibilidad establecida (Tabla 4.23).

Contrario a lo que sucede con las muestras de asfalto PG 70-22, que llegaron a tener una variación de 22.53% (Tabla 4.23). La variable que influyó en el comportamiento viscoelástico lineal, fue la interacción entre el solvente y el polímero. Se aclara que la muestra M1R2 sufrió un calentamiento extra, por lo tanto, en este proceso pudo haberse oxidado, por tal razón la variación disminuyó a 3.34%.

Tabla 4.23. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO - Alambique

Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/senδ (%)	Repetibilidad (%)
MA PG 64-22	64	0.00	0.00	0.00	≤ 9.00
M1R1	64	2.69	1.16	3.78	≤ 9.00
M1R2	64	1.23	1.07	2.25	≤ 9.00
M2R1	64	8.45	1.82	9.79	≤ 9.00
M2R2	64	7.70	1.83	9.04	≤ 9.00
MA PG 70-22	70	0.00	0.00	0.00	≤ 9.00
M1R1	70	17.38	3.85	18.44	≤ 9.00
M1R2	70	2.44	2.78	3.34	≤ 9.00
M2R1	70	21.26	5.62	22.53	≤ 9.00
M2R2	70	20.15	5.48	21.46	≤ 9.00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.24, muestra los resultados de la deformación permanente, los pertenecientes al asfalto PG 64 -22 cambiaron su comportamiento comparado con el valor base (MA B PG 64-22) dando como resultado una variación de 77.25% y 77.93%. Para el caso de las muestras con asfalto PG 70-22 mostraron variaciones menores (0.46% y 7.13%). En la figura 4.7 se observa de manera gráfica que estas últimas muestras tienen un comportamiento similar al de la base (MA B PG 70-22). Mientras que con el asfalto PG 70-22, este comportamiento es diferente al de su base (MA B PG 64-22).

Tabla 4.24. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – MSCR - Alambique

Muestra	Ciclo	$\epsilon_{r 3.2}$	% de Variación
MA PG64-22	30	91.77	
M1R1	30	20.8795	77.25
M2R1	30	20.2553	77.93
MA B PG70-22	30	71.5566	
M1R1	30	71.8878	0.46
M2R1	30	66.4550	7.13

Fuente: Elaboración propia

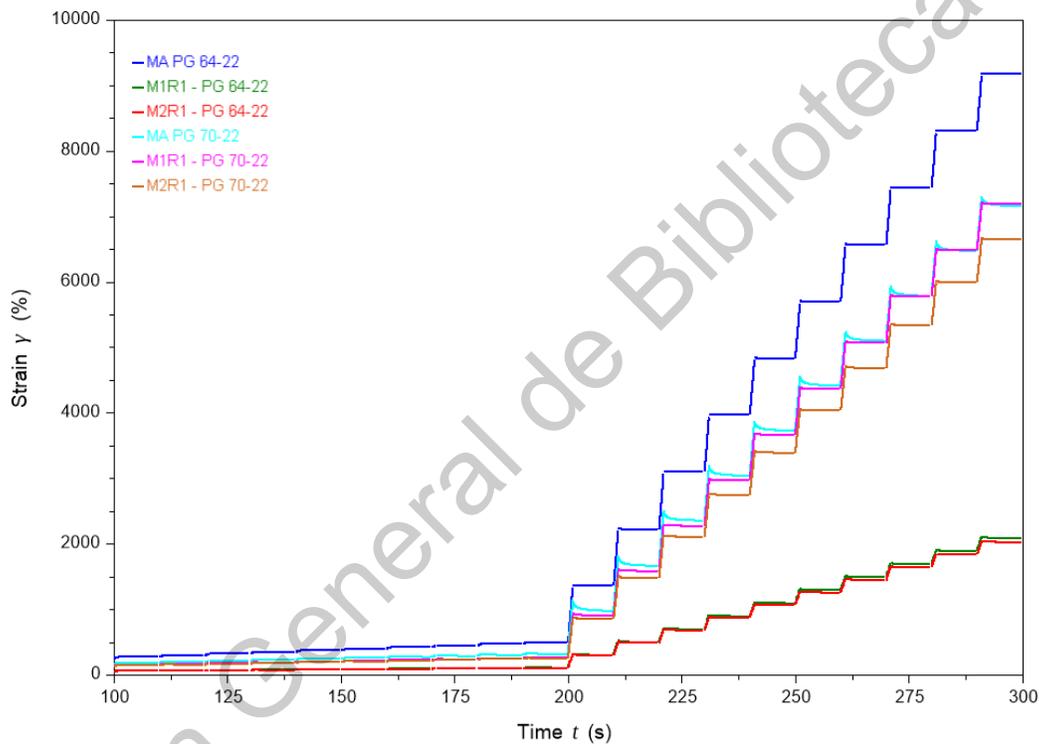


Figura 4. 7. Resultados de MSCR obtenidos de los asfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de laboratorio - Alambique

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Mezcla asfáltica de planta

La tabla 4.25 muestra los resultados de los parámetros G^* , δ y la combinación de ambos ($G^*/\text{sen } \delta$) obtenidos del DSR después de RTFO. Se observa que estos se encuentran por debajo del valor empleado como base (MA PG 76-22). En La tabla 4.26 se comprueba las variaciones y estas se elevan hasta 61.98% con respecto al valor base.

Tabla 4. 25. Resultados de muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Alambique

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)
-	MA PG 76-22	76	3.983	55.396	4.84
140	M1R1	76	1.77	73.50	1.84
140	M1R2	76	2.47	71.40	2.60
140	M2R1	76	1.93	74.20	2.00
140	M2R2	76	1.95	73.80	2.03

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 26. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – DSR RTFO - Alambique

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G^* (%)	δ (%)	$G^*/\text{sen } \delta$ (%)	Repetibilidad (%)
-	MA PG 76-22	76	0	0	0	
140	M1R1	76	55.56	32.68	61.98	≤ 9.00
140	M1R2	76	37.99	28.89	46.28	≤ 9.00
140	M2R1	76	51.54	33.94	58.68	≤ 9.00
140	M2R2	76	51.04	33.22	58.06	≤ 9.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.27 se observa el porcentaje de variación entre muestras con respecto al asfalto base del último ciclo de la prueba del MSCR. Se tiene porcentajes de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r 3.2}$) hasta de 539.53%, el solvente empleado en la extracción es factor importante en el comportamiento de las muestras.

Tabla 4. 27. Variación entre muestras - MA PG 76-22 – MSCR - Alambique

Muestra	Ciclo	$\epsilon_{r 3.2}$	% de Variación
MA PG 76-22	30	28.8662	
M1R1	30	168.829	484.87%
M1R2	30	169.655	487.73%
M2R1	30	184.607	539.53%
M2R1	30	182.303	531.54%

Fuente: Elaboración propia

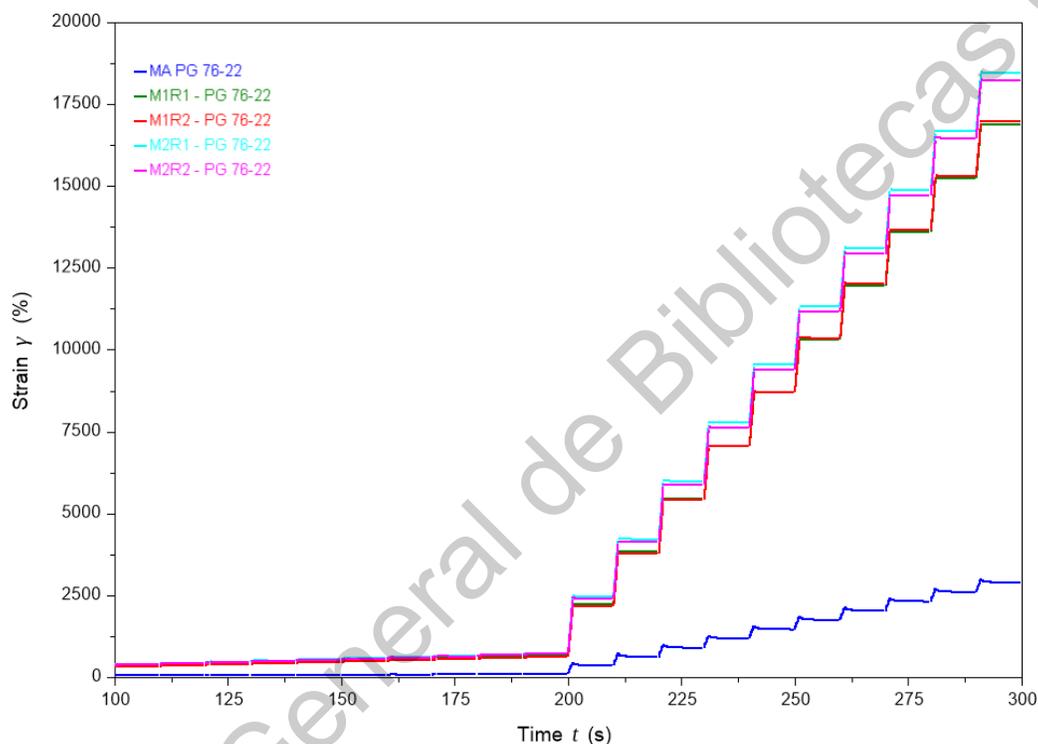


Figura 4. 8. Resultados de MSCR obtenidos de los sfaltos recuperados de la mezcla asfáltica de planta - Rotavapor

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Discusión

En la prueba del MSCR, para las muestras de asfalto modificado obtenido de la mezcla asfáltica, se advierte un comportamiento diferente del que se había observado en el apartado 4.1, por lo tanto, para futuras investigaciones, se recomienda analizar el asfalto en un rango viscoelástico lineal.

Se recomienda realizar pruebas químicas, para medir el efecto asociado al envejecimiento en el RTFO (se observó que este ensayo envejece más que un proceso de laboratorio) y comprobar si en un asfalto sin modificar, el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del asfalto modificado, probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO.

Por otro lado, se encontró que el proceso de mezclado y compactación en laboratorio produce un envejecimiento inferior al que genera el equipo RTFO, el cual está más asociado al envejecimiento en planta.

Dirección General de Bibliotecas UBAQ

4.3 Emulsión asfáltica

A continuación, se muestran los resultados de las extracciones con los dos métodos. El asfalto empleado como base para la emulsión asfáltica fue clasificado como PG 64-22. Mientras que la emulsión se clasificó como Emulsión Cationica de rompimiento rápido con 65 % de asfalto ECR65-90, q.

4.3.1 Extracción en Rotavapor

La tabla 4.28 muestran los resultados obtenidos con estas se calculó la variación porcentual, en donde ninguna muestra cumple con la repetibilidad.

Tabla 4. 28. Resultados de muestras – Emulsión – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen δ (kPa)
-	EM PG 64-22	64	1.81	84.40	1.82
110	M1R1	64	2.11	83.00	2.12
110	M1R2	64	2.14	82.80	2.16
110	M2R1	64	1.98	82.50	1.99
110	M2R2	64	1.99	82.50	2.00

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el asfalto obtenido de la emulsión ha pasado por un proceso, por tal razón se puede comparar con la reproducibilidad, la norma AST D7175-15 establece que debe ser igual o menor a 17 %. Con esto se tiene que sólo una muestra no cumple con este parámetro (18.68%).

Tabla 4. 29. Variación entre muestras - Emulsión – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/senδ (%)	Repetibilidad (%)	Reproducibilidad (%)
-	EM PG 64-22	64	0.00	0.00	0.00		
110	M1R1	64	16.57	1.66	16.48	≤6.4	≤17
110	M1R2	64	18.23	1.90	18.68	≤6.4	≤17
110	M2R1	64	9.39	2.25	9.34	≤6.4	≤17
110	M2R2	64	9.94	2.25	9.89	≤6.4	≤17

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Extracción en Alambique

La tabla 4.30 muestran los resultados obtenidos con estas se calculó la variación porcentual, en donde ninguna muestra cumple con la repetibilidad.

Tabla 4. 30. Resultados de muestras – Emulsión – DSR Original - Rotavapor

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)
-	EM PG 64-22	64	1.81	84.40	1.82
110	M1R1	64	2.14	84.20	2.15
110	M1R2	64	2.05	84.10	2.06
110	M2R1	64	2.03	84.20	2.04
110	M2R2	64	2.01	84.30	2.02

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el asfalto obtenido de la emulsión ha pasado por diferentes procesos, por tal razón se puede comparar con la reproducibilidad, la norma AST D7175-15 establece que debe ser igual o menor a 17 %. Con esto se tiene que sólo una muestra no cumple con este parámetro (18.13%).

Tabla 4. 31. Variación entre muestras - Emulsión – DSR Original - Alambique

T extracción (°C)	Muestra	T (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/senδ (kPa)	Repetibilidad (%)	Reproducibilidad (%)
-	EM PG 64-22	64	0.00	0.00	0.00		
110	M1R1	64	18.23	0.24	18.13	≤6.4	≤17
110	M1R2	64	13.26	0.36	13.19	≤6.4	≤17
110	M2R1	64	12.15	0.24	12.09	≤6.4	≤17
110	M2R2	64	11.05	0.12	10.99	≤6.4	≤17

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Discusión

La temperatura empleada en ambos procesos no afecta las propiedades viscoelásticas lineales del asfalto. No se recomienda tomar los valores de repetibilidad, se debe considerar que el asfalto ha pasado por diferentes procesos, desde cuando se fabrica la emulsión, por tal razón se consideraron los valores de reproducibilidad.

5. CONCLUSIONES

- **La temperatura óptima de extracción en el Rotavapor es a 140°C**, ya que a esta temperatura se obtiene valores del rango viscoelástico lineal dentro de la repetibilidad establecida, tanto en un asfalto asfáltico convencional como en un asfalto modificado.
- Con el **método del alambique**, se manejan temperaturas que oscilan entre 200 y 260°C, lo que **influye en la oxidación del** asfalto.
- **La deformación permanente** no muestra alguna relación con las propiedades viscoelásticas lineales:
- Se recomienda realizar pruebas químicas, para medir el efecto asociado al envejecimiento en el RTFO (se observó que este ensayo envejece más que un proceso de laboratorio) y comprobar si en un asfalto sin modificar, el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del asfalto modificado, probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO.
- Por otro lado, se encontró que el proceso de mezclado y compactación en laboratorio produce un envejecimiento inferior al que genera el equipo RTFO, el cual está más asociado al envejecimiento en planta.
- **Para emulsiones asfálticas** la temperatura empleada en los procesos de Recuperación en alambique y rotavapor no afecta las propiedades viscoelásticas lineales del asfalto.
- Con base a los resultados obtenidos se concluye que se cumple con la hipótesis en donde el método de extracción de rotavapor tiene menor impacto en las propiedades físicas y mecánicas del asfalto recuperado, reflejado en el grado de desempeño (Grado PG) que el método de destilación. Se hace énfasis que en el caso de las emulsiones ambos procedimientos no tienen efecto en las propiedades viscoelásticas lineales del asfalto.

6. REFERENCIAS

Al-Busaltan, S., Al Nageim, H., Atherton, W., y Sharples, G. (2012). Green Bituminous Asphalt relevant for highway and airfield pavement. *Construction and Building Materials*, 243-250.

AASHTO . (2014). *Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test* . Estado Unidos : AASHTO .

Asphalt Institute. (1998). *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. Lexington: SHRP.

Asphalt Institute. (S.A.). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*. Lexington: Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association . (2001). *Asphalt Recycling* . Estados Unidos: Federal Highway Administration .

ASTM International . (2012). *ASTM D6997 Standard Test Method for Distillation of Emulsified Asphalt*. Estados Unidos : ASTM International .

ASTM International . (2013). *ASTM D977 Standard Specification for Emulsified Asphalt* . Estados Unidos : ASTM International .

ASTM International . (2014). *ASTM D7173 Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer Modified Asphalt* . Estados Unidos : ASTM International .

ASTM International . (2014). *ASTM D36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. Estados Unidos : ASTM International .

ASTM International . (2016). *ASTM 6373 Standard Specification for Performance Grade Asphaltt Binder* . Estados Unidos : ASTM International .

ASTM International. (2012). *ASTM D5404 Standard Practice for Recovery of Asphalt from solution Using the Rotary Evaporator*. Estados Unidos: ASTM International.

- Cipione, C., Davison, R., Burr, B., Glover, C., y Bullin, J. (1991). Evaluation of Solvent for Extraction of Residual Asphalt from Aggregates. *Transportation Research Record*, 1-8.
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Virginia: Federal Highway Administration (FHWA).
- Ding , H., Gyasi, J., Hesp, S. A., Maks, P., Nie, Y., Somuah, M., . . . Ubaid, I. (2017). Performance grading of extracted and recovery asphalt cements . *Construction and Building Materials* (186), 999-1003.
- Hanz, A., Arega , Z., y Bahia, H. (2010). *Rheological Behavior of Emulsion Residues Produced by Evaporative Recovery Method*. Estados Unidos : Transportation Research Record .
- Hong, F., Guo, R., y Zhou, F. (2014). Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performanc. *Road Materials and Pavement Desig*, 841-855.
- Kennedy, T., Weng, T., y Mansour, S. (1998). Effect of reclaimed asphalt pavement on binder properties using the superpave system. *Center for transportation research*, 51-59.
- Leiva Villacorta , F., y Vargas Nordcbeck , A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Infraestructura Vial* , 35-44.
- Ma , T., y Huang, X. (2008). *Recycling law of aged asphalt based on composite theory of material*. China: Journal of Southeast University.
- McDaniel, R., y Anderson, R. (2001). *Recommended use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Metho: Technician's Manual. Report 452*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- McMillan, C., y Palsat, D. (1985). Alberta's Experience in Asphalt Recycling. *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*, 30, 148-167.

- Mercado , R., y Fuentes , L. (2017). Measure of asphalt emulsions stability by oscillatory rheology . *Construction and Building Materials* , 838-845.
- Metha , Y., Nolan , A., Norton , A., Coffey , S., Dubois , E., Shirokar , P., . . . Tomlinson , C. (2012). *High Reclaimed Asphalt Pavement*. Washington, D.C. : Federal Highway Administration.
- NAPA. (1996). *Recycling Hot Mix Asphalt Pavements*. Lahman, MD.
- NAPA. (2002). "*Reciclado de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*". Washington, DC: FHA.
- National Cooperative Highway Research Program. (1978). Recycling Materials for Highways. *Transportation Research Board*.
- Norton Jr , A. (2012). *High Reclaimed Asphalt Pavement in hot mix asphalt*. 2012: Federal Highway Administration .
- Riccardi , C., Carrión del Barco , A. J., Lo Presti , D., Cannone Falchetto , A., Losa, M., y Wistuba, M. (2017). *A new procedure to determine the rheological properties of RAP binder and corresponding bituminous blends*. Italia : Elsevier.
- Robertson, R., Branthaver, J., Plancher, H., y Duvall, J. (1991). Chemical properties of asphalts and their relationships to pavement performance. *Transportation Research Board*, 30.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2002). *M-MMP-4-05-024 Recuperación Elástica por Torsión en Cemento Asfáltico Modificado*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2005). *N-CMT-4-05-004/05 Calidad de los materiales Asfálticos Grado PG*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2006). *N-CMT-4-05--002/06 Calidad de Materiales Asfálticos Modificados*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2017). *M-MMP-4-05-055/17 Prueba de Esfuerzo-Deformación-Recuperación Múltiple (MSCR)*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2000). *N-CMT-4-05-001/00 Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). *N-CMT-4-05-004/18*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2006). *N-CMT-4-05-001/06 Calidad de materiales asfálticos*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Sirin , O., y Paul , D. K. (2018). *Development of a Modified Rotavapor Apparatus and Method for Short-Term Aging of Modified Asphalts*. Estados Unidos : Advances in Civil Engineering.

Smiljanic, M., J. Stefanovic, H.-J. Neumann, I. Rahimaian, y J. Jovanovic. (1993). *Aging of Asphalt on Paved Roads — Characterization of Asphalt Extracted from the Wearing Courses of the Belgrade-Nis Highway*. Germany: Journal of Erdol and Kohl.

Transportation Research Board . (2007). *Transportation Research Circular E-C122 Asphalt Emulsion Technology Review of Asphalt Emulsion Residue Procedure* . Washington, D.C.: Transportation Research Board .

Transportation, U. D. (6 de Agosto de 2018). *Federal Highway Administration* . Obtenido de www.fhwa.dot.gov

Zhang, X., y Huber, G. (1996). EFFECT OF ASPHALT BINDER ON PAVEMENT PERFORMANCE: AN INVESTIGATION USING THE SUPERPAVE MIX

DESIGN SYSTEM (WITH DISCUSSION). *Transportation Research Board (TRB)*,
449-490.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Dirección General de Bibliotecas UAQ