



Calibración y verificación de la recuperación de un ligante asfáltico en tricloroetileno mediante el equipo de rotavapor

Calibration and verification of the recovery of an asphalt binder in trichloroethylene by means of the rotavapor

Limeta-Dionet Esbeydi Janet

Universidad Autónoma de Querétaro

Correo: elimeta529@alumnos.uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1156-4739>

Delgado-Alamilla Horacio

Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro

Correo: hdelgado@imt.mx

<https://orcid.org/0009-0008-2569-6258>

López-Lara Teresa

Universidad Autónoma de Querétaro

Correo: lolte@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7289-7919>

Resumen

El presente trabajo evalúa las temperaturas de extracción por el método de Rotavapor, con el objetivo de encontrar la temperatura óptima de extracción para minimizar el endurecimiento por calor y maximizar la recuperación del disolvente en el ligante asfáltico. Para comprobar el impacto que ocasiona la temperatura en el ligante asfáltico se empleó el equipo Reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés), donde se midió el desempeño con el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$, asimismo, se evaluó la deformación con el ensayo de Recuperación Elástica por Creep Repetido (MSCR). Cabe destacar que la normativa determina que la evaluación se debe realizar con asfalto producto de RTFO, pero para fines de investigación en la etapa uno y dos, se realizó en condición original. El estudio consta de tres etapas: En la primera etapa se realizó la "Calibración del ensayo" para determinar un procedimiento que asegure la reproducibilidad de las mediciones sin afectar las características del ligante evaluado, se tomaron porciones de 10 y 30 g de un ligante asfáltico sin modificar, los cuales fueron disueltos en tricloroetileno para posteriormente hacer las recuperaciones en el Rotavapor a temperaturas de 110 y 140 °C. Basándose en los resultados obtenidos se prosiguió con la segunda etapa, la cual consistió en verificar si la condición establecida era válida para cualquier tipo de ligante. Finalmente, se fabricó mezcla con los dos tipos de ligante asfáltico evaluados en las etapas anteriores. Los resultados obtenidos muestran que la temperatura de extracción óptima es a 140 °C, sin embargo, se recomienda ampliar la investigación con 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 ligante sin modificar el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del ligante modificado probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO, ya que con los resultados obtenidos en la prueba del MSCR, se tuvo variaciones de hasta 234.4 %.

Descriptores: RAP, rotavapor, tricloroetileno, ligante asfáltico, DSR.

Abstract

The present work evaluates the extraction temperatures by the Rotavapor method, with the objective of finding the optimal extraction temperature to minimize heat hardening and maximize solvent recovery in the asphalt binder. To check the impact caused by the temperature on the asphalt binder, the Dynamic Shear Rheometer (DSR) was used, where the performance was measured with the parameter $G^*/\text{sen } \delta$, likewise the deformation was evaluated with the Repeat Creep Elastic Recovery Test (MSCR). It is worth mentioning that the specific regulation that the evaluation must be done with asphalt produced by RTFO, but for research purposes it was done as in the original condition. The study consists of three stages: in the first stage the «Test Calibration» was done to determine a procedure that would ensure the reproducibility of the measurements without affecting the characteristics of the evaluated binder, 10 and 30 g portions of an unmodified asphalt binder were taken, which were dissolved in trichloroethylene, to later make the recoveries in the Rotavapor at temperatures of 110 and 140 °C. Based on the results obtained, the second stage was followed, which consisted of verifying if the established condition was valid for any type of binder. Finally, a mixture was produced with the two types of asphalt binder evaluated in the previous stages. The results obtained show that the optimum extraction temperature is 140 °C, however, it is recommended to extend the investigation with chemical tests, to determine a procedure for modified binders, since with the results obtained in the MSCR test, there were variations of up to 234.4 %. It was also concluded that the RTFO test ages the asphalt binder more than the mixing and compaction done in the laboratory for the fabrication of specimens.

Keywords: RAP, rotavapor, trichloroethylene, asphalt binder, DSR.

INTRODUCCIÓN

La aportación del asfalto envejecido existente en el Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP, por sus siglas en inglés) sirve como ligante asfáltico de una nueva mezcla, esta aportación depende de la temperatura y del tiempo de mezclado, así como del grado de envejecimiento del ligante residuo de RAP (Montañez *et al.*, 2019). Para evaluar el grado de envejecimiento del ligante asfáltico es necesario separar la mezcla asfáltica en sus componentes, por lo tanto, es ineludible elegir un procedimiento de extracción que no cause cambios significativos en sus propiedades (Hospodka *et al.*, 2017).

Por un lado, es importante determinar qué tipo de disolvente será empleado para la extracción del ligante asfáltico de la mezcla. El disulfuro de carbono (CS₂) (Bateman y Delp, 1997) y el benceno (C₆H₆) que fueron populares en 1900, se determinaron como cancerígenos (Burr *et al.*, 1960), así que se sustituyeron por los disolventes clorados como el tricloroetileno (TCE, C₂HCl₃), el 1-1-1-tricloroetano (C₂H₃Cl₃) y el diclorometano (CH₂Cl₂) (Cipione, *et al.*, 1991); estos disolventes son menos agresivos para la salud. Por otro lado, en Estados Unidos existen diferentes métodos para la recuperación de ligante asfáltico y disolvente como: Evaporador rotativo y recuperación por el método Abson (Hospodka *et al.*, 2017).

Así mismo, Bayane *et al.* (2017) coinciden en lo siguiente:

1. El asfalto no se extrae completamente del agregado.
2. El solvente permanece en el asfalto después de la recuperación.
3. La reacción del asfalto mientras está en solvente puede alterar las propiedades físicas y mecánicas durante la extracción y recuperación.

Para esta investigación se realizó la calibración con el equipo de rotavapor y tricloroetileno, con el objetivo de encontrar la temperatura óptima de extracción para minimizar el endurecimiento por calor y maximizar la recuperación del disolvente.

GRADO PG

En la metodología del Grado PG, el equipo principal es el Reómetro de corte dinámico (por sus siglas en inglés DSR), el cual permite caracterizar las propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico: módulo complejo de corte (G^*) y ángulo de fase (δ), a distintas temperaturas (Ayala, *et al.*, 2016). A continuación, se explican las

pruebas para medir las propiedades viscoelásticas lineales.

DSR EN CONDICIÓN ORIGINAL

El procedimiento que establece la norma ASTM D7175-15, 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 de cumplimiento es $G^*/\text{sen } \delta$ mayor o igual 1 kPa.

ENVEJECIMIENTO EN RTFO

Adicionalmente se utiliza un horno rotatorio de película delgada (RTFO), el cual simula el envejecimiento por el proceso de mezclado, transportación y compactación de la mezcla asfáltica, este acondicionamiento se realiza colocando 35 g de asfalto en un vaso de cristal. El asfalto se envejece a una temperatura de 163 °C durante 85 min (ASTM D2872-12).

DSR CON RESIDUO DE RTFO

Este ensayo se realiza de acuerdo con el procedimiento planteado por la ASTM D7175-15 para un asfalto residuo de RTFO, esto con el fin de evaluar la resistencia a la deformación permanente de un ligante asfáltico en el rango viscoelástico lineal, debido a que las roderas son más susceptibles a formarse al inicio del pavimento.

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 de cumplimiento es $G^*/\text{sen } \delta$ mayor o igual 2.2 kPa.

DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para evaluar la deformación en el asfalto se emplea el ensayo de Recuperación Elástica por Creep Repetido (MSCR, por sus siglas en inglés), que se refiere a la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables, lo que se traduce en el pavimento, como roderas o ahuellamiento. 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 (ASTM D7405-15).

DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES

En el estudio se utilizaron dos diferentes ligantes asfálticos, el primero fue un asfalto de base, el cual se clasificó como PG 64-22 proveniente de la refinería de Salamanca, México. El segundo fue un asfalto modificado en laboratorio y clasificado como un asfalto PG 70-22. Las clasificaciones se realizaron bajo la norma ASTM D6373-1 6.

DESARROLLO

El estudio consta de tres etapas; en la primera etapa se realizó la “Calibración del ensayo”; una de las primeras preguntas en la ejecución del protocolo de ensayo era si realmente se podría eliminar el solvente del asfalto después de la extracción y si al elevar la temperatura se produciría un envejecimiento excesivo en el asfalto. En la etapa denominada: “Calibración del ensayo”, se determinó un procedimiento que asegurara la reproducibilidad de las mediciones sin afectar las características del asfalto evaluado.

La segunda etapa consistió en verificar si la condición establecida era válida para cualquier tipo de ligante, para ello se tomó un ligante modificado PG 70-22.

En la tercera etapa se fabricó una mezcla con los dos tipos de ligante asfáltico evaluados en las etapas anteriores; el objetivo de esta etapa fue simular el RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*).

La nomenclatura empleada en las diferentes etapas se muestra en la Tabla 1.

ETAPA 1: CALIBRACIÓN DEL ENSAYO

La evaluación se realizó con el asfalto base PG 64-22 tomando porciones de 10 g y 30 g, donde las masas de asfalto simulan la concentración de asfalto que se tiene cuando se recupera el ligante del RAP; estas se diluyeron en 500 ml de tricloroetileno, posteriormente fueron destilados con ayuda del rotavapor a temperaturas de 110 °C y 140 °C. El baño de aceite se calentó a la temperatura de ensayo. El matraz contenía aproximadamente 500 ml de tricloroetileno con asfalto, mismo que se introdujo al baño de aceite para proceder a la rotación del matraz de destilación a 40 r.p.m. 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. 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.

Los residuos asfálticos obtenidos en el proceso de destilación se evaluaron en el DSR, siguiendo la normativa de la ASTM D7175-15, donde 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. La Tabla 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.

Se calculó la variación porcentual respecto al asfalto base (B PG 64-22), mostrados en la Tabla 3. En el valor de G^* , la variación mayor 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 $G^*/\text{sen } \delta$, se observa que no se cumple con la repetibilidad establecida en el método de ensayo, la norma ASTM D7175-15 establece que un rango aceptable entre dos resultados hecho 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 dis-

Tabla 1. Nomenclatura

Etapas	Material base	Grado PG	Nomenclatura
Calibración del ensayo	Sin modificar	64-22	B PG 64-22
Validación para un ligante modificado	Modificado	70-22	B PG 70-22
Mezcla asfáltica	Sin modificar	64-22	MA PG 64-22
Mezcla asfáltica	Modificado	70-22	MA PG 70-22

Tabla 2. PG 64-22-10 g – DSR Original

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	M2R2	64	-	-	-

Tabla 3. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 10 g – DSR Original

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	M2R2	64	-	-	-

persos, ya que al aumentar la temperatura se reduce la dispersión.

Se destaca que 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.

Los resultados de la evaluación a una concentración de 30 g se presentan en la Tabla 4 y la variación porcentual se muestra en la Tabla 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 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.

Al realizar la recuperación de ligante asfáltico 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 ligante asfáltico a una temperatura de 140° C.

Adicional a la evaluación del DSR en condición original se evaluó la deformación permanente de acuerdo con 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 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 6 presenta los datos del porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r,3.2}$) del ciclo 30

Tabla 4. PG 64-22 a 30 g – DSR Original

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

Tabla 5. Variación entre muestras – B PG 64-22 a 30 g – DSR Original

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	M2R2	64	0.52	1.99	0.33	≤6.4

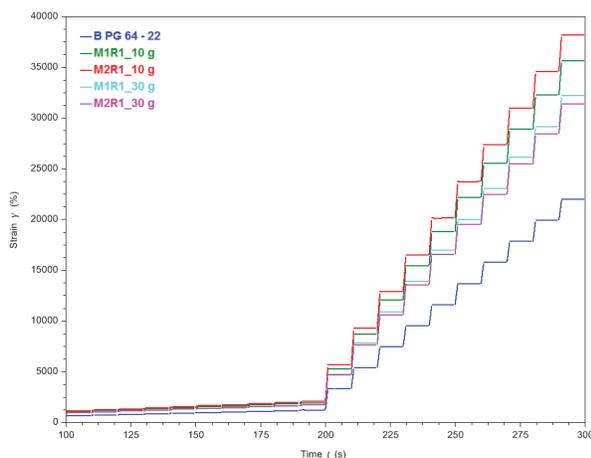


Figura 1. Resultados de MSCR (PG 64-22)

Fuente: Elaboración propia

obtenido de la prueba del MSCR, calculado según la norma ASTM D7405-15; con esto se procedió al cálculo del porcentaje de variación 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 ligante asfáltico a deformación permanente (Tabla 6),

sin embargo, esto no puede ser observado en la evaluación de sus propiedades viscoelásticas lineales (Tabla 4). Para fines de evaluación del procedimiento de recuperación se recomienda analizar el asfalto en un rango viscoelástico lineal.

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

Muestra	Ciclo	$\epsilon_{r3.2}$	% 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

ETAPA 2: VALIDACIÓN PARA UN LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO

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 ligante asfáltico. Para esto, se realizó el mismo protocolo de extracción a una temperatura de 140 °C en un ligante modificado, el cual fue clasificado como un PG 70-22. La Tabla 7 muestra los resultados del DSR en condición original del ligante a 70° C, se observa que los resultados de la muestra M1R1 de 10 g se encuentran por debajo del ligante asfáltico base (B PG 70-22); esto se comprueba en la Tabla 8, para el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ la variación porcentual es de 34.22 %, y no se pudo determinar el resultado en M1R2,

porque el residuo de la muestra de 10 g no fue suficiente para fabricar la pastilla.

En lo referente a la repetibilidad respecto al ligante base (B PG 70-22), la muestra de 10 g no cumplió con este parámetro (Tabla 8), mientras que las muestras de 30 g están dentro de los valores permisibles, por lo cual, si se toman 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 al asfalto sin afectar estas propiedades, ya sea por los residuos de solvente restantes en el asfalto o por un envejecimiento excesivo durante la extracción.

En la Tabla 9 se observa el porcentaje de variación entre muestras del último ciclo de la prueba del MSCR, respecto al asfalto base (B PG 70-22), donde las mues-

Tabla 7. PG 70-22- 10 y 30 g- DSR Original

T extracción (°C)	Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)
-	B PG 70-22	-	70	1.249	77.855	1.277
140	M1R1	10	70	0.822	78.00	0.840
140	M1R2	10	70	-	-	-
140	M1R1	30	70	1.256	78.15	1.283
140		30	70	1.286	78.13	1.315

Tabla 8. Variación entre muestras - B PG 70-22 – DSR Original

T extracción (°C)	Muestra	Cantidad (g)	T (°C)	G^* (%)	δ (%)	$G^*/\text{sen } \delta$ (%)	Repetibilidad (%)
B PG 70-22	B PG 70-22	-	70	0	0	0	-
M1R1	M1R1	10	70	34.16	0.19	34.22	≤6.4
M1R2	M1R2	10	70	-	-	-	≤6.4
M1R1	M1R1	30	70	1.35	0.47	1.19	≤6.4
M1R2	M1R2	30	70	1.27	0.50	1.39	≤6.4

Tabla 9. Variación entre muestras - B PG 70-22 – MSCR

Muestra	Cantidad (g)	Ciclo	$\epsilon_{r3.2}$	% 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 %

tras de 10 g presentan un porcentaje de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r,3.2}$) de 92.11 % y 79.76 %.

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 ligante asfáltico. Nuevamente, se tiene un comportamiento similar a la etapa 1, en donde el disolvente (tricloroetileno) afecta las propiedades del ligante asfáltico modificado a deformación permanente (Tabla 9) y no puede ser observado en la evaluación de sus propiedades viscoelásticas lineales (Tabla 7).

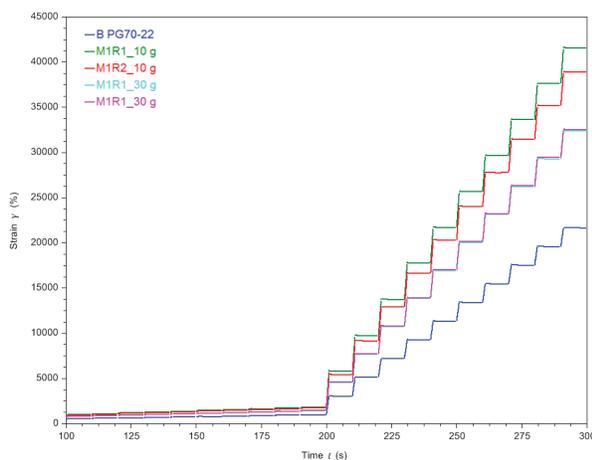


Figura 2. Resultados de MSCR (PG 70-22)

Fuente: Elaboración propia

ETAPA 3

En la tercera etapa de evaluación se modificó el proceso; se fabricó mezcla asfáltica con los dos tipos de ligantes anteriormente evaluados. Las mezclas se elaboraron a una temperatura de mezclado de 160 °C, una temperatura de compactación de 150° C. Posteriormente, fueron calentadas nuevamente y disgregadas a 130 °C, se tomó una muestra de 1 kg. Con ayuda de un equipo de centrifugado (rotarex) y el tricloroetileno se extrajo el asfalto de la mezcla asfáltica, teniendo como resultado asfalto + tricloroetileno. Para recuperar el asfalto del tricloroetileno se utilizó el rotavapor sometiendo la muestra a temperaturas extracción de 140 °C.

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 $G^*/\text{sen } \delta \geq 2.2$ kPa.

La Tabla 10, muestra los resultados en condición DSR - RTFO de los dos ligantes empleados en la elaboración de las mezclas asfálticas (MA PG 64-22 y MA PG 70-22), los cuales se encuentran por debajo de los resultados base; 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.

En los resultados mostrados en la Tabla 11 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.

En la Tabla 12 se observa el porcentaje de variación entre muestras respecto al asfalto base del último ciclo de la prueba del MSCR; las muestras pertenecientes al ligante sin modificar reflejan porcentajes de recuperación a 3.2 kPa ($\epsilon_{r,3.2}$) de 10.32 % y 0.09 %, contrario a lo que sucede en un asfalto modificado, en el cual se presenta hasta un 234.44 % de variación.

En la Figura 3 se presenta de manera gráfica el comportamiento de los asfaltos producto de la mezcla asfáltica M1R1-PG64-22 y M2R1-PG64-22, estos indican un comportamiento similar al resultado base (MA PG64-22), contrario a lo que sucede con las muestras del ligante modificado, 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 ligante sin modificar el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del ligante modificado, probar si es más importante el efecto del solvente que el envejecimiento en el RTFO.

Tabla 10. Resultados de muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO

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

Tabla 11. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – DSR RTFO

T extracción (°)	Muestra	T (°C)	G* (%)	δ (%)	G*/sen δ (%)	Repetibilidad (%)
-	MA PG 64-22	64	3.573 kPa	83.34 °	3.597 kPa	
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	2.705 kPa	73.945 °	2.814 kPa	
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

Tabla 12. Variación entre muestras - MA PG 64-22 y MA PG 70-22 – MSCR

Muestra	Ciclo	ε _{r,32}	% 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 %

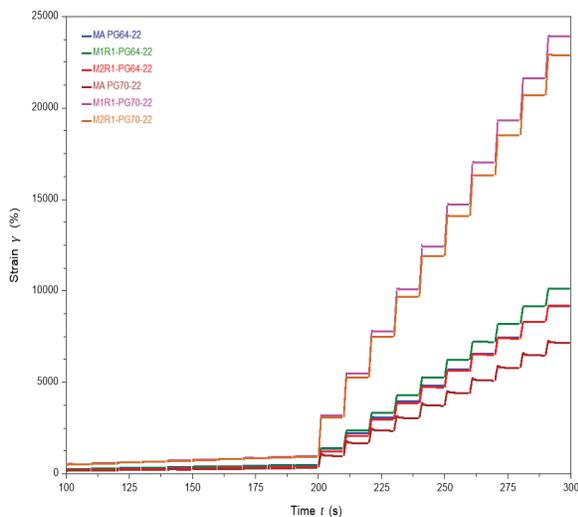


Figura 3. Resultados de MSCR obtenidos de los ligantes asfálticos recuperados de la mezcla asfáltica
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Se estableció un procedimiento para la extracción y evaluación de un ligante asfáltico proveniente de una mezcla asfáltica de RAP, el cual fue validado mediante el uso del equipo Rotavapor.

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 obtienen valores del rango viscoelástico lineal dentro de la repetibilidad establecida, tanto en un asfalto convencional como en un asfalto modificado. En el caso del ligante sin modificar (PG 64-22) producto de la extracción de mezcla asfáltica la temperatura para la recuperación en el rotavapor no tuvo mayor influencia en los diferentes parámetros (T=110 Y 140 °C), contrario a lo que sucedió en el ligante modificado (PG 70-22), donde la variación entre resultados de las dos temperaturas difirió más a la temperatura de 110 °C que a 140 °C.

En la prueba del MSCR, en las muestras de ligante modificado obtenido de la mezcla asfáltica, se advierte un comportamiento diferente del que se había observado en las etapas 1 y 2, por lo tanto, para futuras investigaciones se recomienda analizar el asfalto en un rango viscoelástico lineal.

Se proponen 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 ligante sin modificar el envejecimiento compensa el reblandecimiento por el solvente; en el caso del ligante 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 mezcla y compactación en laboratorio produce un envejecimiento inferior al que genera el equipo RTFO, el cual está más asociado al envejecimiento en planta.

REFERENCIAS

- ASTM D2872-12. (2013). Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling thin-film oven test).
- ASTM D6373-16. (2021). Standard specification for performance graded asphalt binder.
- ASTM D7175-15. (2017). Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer.
- ASTM D7405-15. (2020). Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer.
- Ayala del Toro, Y., Delgado, H., & Garnica, P. (2016). Efecto de la temperatura en la evaluación de la fatiga en ligantes asfálticos. *Infraestructura Vial, Lanamme UCR*, 5-13. <https://doi.org/10.15517/iv.v18i31.27755>
- Bateman, J., & Delp, C. (1997). The recovery and examination of the asphalt in the asphaltic paving mixtures. *ASTM*, 465-479.
- Bayane, M., Zhang, X.-h., Zhou, S.-w., & Qiu, Y. (2017). Effect of Extraction Residue on the Properties of Asphalt Binder. *Global Journal Inc*, 21-29.
- Burr, B., Davison, R., Glover, C., & Bullin, J. (1960). Solvent removal from asphalt. *Transportation Research Record*, 246-252.
- Cipione, C., Davison, R., Burr, B., Glover, C., & Bullin, J. (1991). Evaluation of solvent for extraction of residual asphalt from aggregates. *Transportation Research Record*, 1-8.
- Hospodka, M., Hofko, B., & Blab, R. (2017). Impact of distillation temperature on the solvent residue and viscoelastic properties of asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*. <http://doi://10.1080/14680629.2017.1304234>
- Montañez, J., Caro, S., Carrizosa, D., Calvo, A., & Sánchez, X. (2019). Variability of the mechanical properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) obtained from different sources. *Construction and Building materials*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116968>

BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- Burr, B., Davison, R., Glover, C., & Bullin, J. (1993). New apparatus and procedure for the extraction and recovery of asphalt binder from pavement mixture. *Transportation Research Record*, 20-29. Recuperado de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1391/1391-003.pdf>
- Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Shrestha, R. (2011). Laboratory evaluation of mixes containing recycled asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 495-517.

- Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. (2014). Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performanc. *Road Materials and Pavement Desig*, 841-855.
- Kandhal, P., & Foo, K. (1997). Designing recycled hot mix asphalt mixtures using superpave technology. ASTM Special.
- Mercado, R., & Fuentes, L. (2017). Measure of asphalt emulsions stability by oscillatory rheology. *Construction and Building Materials*, 838-845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.095>
- Sreeram, A., & Leng, Z. (2018). Variability of rap binder mobilisation in hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 502-509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.212>

Cómo citar:

- Limeta-Dionet, E. J., Delgado-Alamilla, H., & López-Lara, T. (2023). Calibración y verificación de la recuperación de un ligante asfáltico en tricloroetileno mediante el equipo de rotavapor. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (04), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.4.032>