

ANÁLISIS REOLÓGICO DE ASFALTOS MODIFICADOS

Fabián Elizondo Arrita
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
fabian.elizondo@ucr.ac.cr

Jorge Salazar Delgado
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
jorge.zalazar@ucr.ac.cr

Ernesto Villegas Villegas
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
ernesto.villegas@ucr.ac.cr

Resumen

El uso de asfaltos modificados en la construcción de pavimentos flexibles se ha extendido a nivel mundial como respuesta a condiciones más severas durante su vida útil y buscando un mejor desempeño que permita prolongar su duración. Costa Rica no se escapa a esta realidad, su red vial se caracteriza por estar expuesta a un clima tropical, donde para muchas zonas se supera el 50 % de días de lluvia al año, altos volúmenes de tránsito, esto aunado a porcentajes altos de vehículos pesados con sobrecargas y una topografía montañosa.

Los asfaltos modificados en Costa Rica se caracterizan por ser una alternativa reciente, actualmente no se cuenta con productores de asfaltos modificados, por lo que su fabricación se ha enmarcado a empresas productoras de MAC, las cuales modifican el asfalto en planta mediante sistemas básicos, que no permiten la utilización de algunas presentaciones de aditivos, y donde los controles de calidad se dificultan ya que la modificación se realiza dentro del proceso de producción. Pese a que se han presentado mejoras en las mezclas asfálticas que utilizan aditivos mediante este sistema, creemos que es hora de dar un paso hacia adelante.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo comparar diferentes tipos de aditivos para asfalto, dentro de los que se encuentran los actualmente utilizados en Costa Rica caracterizados por tener una consistencia líquida y otros que por su consistencia sólida no pueden ser modificados en planta; la valoración de sus propiedades se hará mediante parámetros reológicos (Grado de Desempeño, Creep repetido original y RTFOT, Recuperación elástica y el MSCR “Multi stress creep recovery”); por último, la investigación intenta dar herramientas para valorar la efectividad de estos tipos de aditivos en la mejoría de las propiedades del asfalto e implementar los ensayos reológicos como medio para especificar sus propiedades.

INTRODUCCIÓN

El uso de modificantes de asfalto en Costa Rica se caracteriza por ser una alternativa reciente, no existen empresas formales en torno a la fabricación de asfaltos modificados por lo que las empresas constructoras y la Administración por medio del Ministerio de Obras Públicas y

Transportes (MOPT) se han visto en la necesidad de implementar procesos de modificación en planta de producción de MAC. Este tipo de modificaciones se caracteriza por el uso de aditivos de consistencia líquida los cuales son mezclados con el asfalto poco antes de ingresar al tambor mezclador de una planta continua de mezcla asfáltica en caliente.

En cuanto a especificaciones a cumplir por parte de los asfaltos modificados con polímeros, el desarrollo lo podríamos dividir en 3 etapas: *la primera*, se caracterizó por ser muy básica; por tratarse de la implementación de una nueva tecnología se enfocó en proyectos de prueba con el fin de calibrar el proceso productivo y constructivo, y realizar comparación entre los valores de ensayos típicos obtenidos de mezclas convencionales y las nuevas mezclas modificadas; *la segunda*, se basó en la especificación de porcentajes de mejora en las propiedades de mezclas modificadas respecto a estas mismas mezclas con asfaltos sin modificar, los ensayos típicamente especificados fueron el de Módulo resiliente a tensión diametral (MRTD) y el de Deformación permanente en pista de ensayo (APA); *la tercera* etapa en la que nos encontramos se basa en la especificación de valores mínimos a cumplir por la mezcla asfáltica en ensayos de desempeño, específicamente: MRTD, APA, Resistencia retenida a la tensión diametral y fatiga en vigas a flexotracción; además de especificar para el asfalto modificado valores mínimos de grado de desempeño (PG).

Pese a que el proceso que se ha llevado ha seguido un orden racional, creemos que se podrían mejorar las especificaciones incorporando nuevos ensayos al asfalto modificado que permitan valorar la efectividad de un polímero en la mejoría de su desempeño. Actualmente solo se especifica el PG como ensayo al asfalto modificado, sin embargo es reconocido que este ensayo no siempre logra discriminar entre asfaltos modificados con comportamientos diferentes. Por otra parte los ensayos especificados a la mezcla asfáltica dependen no solo de las propiedades del asfalto por lo que podrían no ser tan evidentes las ventajas entre uno u otro polímero.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de ensayos para caracterización de asfaltos modificados como herramienta para discriminar entre asfaltos con propiedades y comportamientos diferentes, al mismo tiempo que se analizan especificaciones existentes y su posible implementación en Costa Rica.

CONCEPTOS GENERALES Y ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Asfaltos Modificados con Polímeros

Podemos definir un *polímero* como un compuesto de alto peso molecular formadas por la unión de moléculas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples), los cuales al unirse forman moléculas más grandes en distintos arreglos. Por su parte los *asfaltos modificados con polímeros* son asfaltos a los cuales se les ha adicionado algún polímero con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

La modificación de asfaltos con polímeros busca mejorar sus propiedades viscoelásticas para cumplir con los requerimientos de un proyecto, de manera muy concisa se puede decir que mediante la modificación se desea mejorar la elasticidad y flexibilidad, la consistencia y la durabilidad con el fin de evitar que un mezcla asfáltica se fisure, se deforme o que existan desprendimientos. Es por lo anterior que al analizar un asfalto modificado nos interesa valorar el potencial que tiene para recuperarse elásticamente y en condiciones de envejecimiento, con este enfoque estaríamos valorando su capacidad de absorber esfuerzos sin presentar fisuras,

deformarse elásticamente para evitar deformaciones plásticas, lo anterior luego de un proceso de envejecimiento relacionado con la durabilidad.

Ensayos para la Caracterización de Asfaltos Modificados

Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) o Recuperación Elástica a Diferentes Esfuerzos

Este ensayo se encuentra especificado bajo la norma AASHTO TP70-07 y consiste en la medición de las propiedades viscoelásticas (mediante el “*creep compliance*”) de un asfalto envejecido en un horno RTFO, al aplicarle un esfuerzo de 100Pa y 3200Pa. El ensayo mide la respuesta elástica en un ligante asfáltico sometido a un esfuerzo cortante y recuperación.

El “*creep compliance*” no recuperable es una medición de la deformación permanente y se define como el porcentaje de deformación unitaria residual (%ε) de un espécimen luego de ser sometido a un ciclo de carga y recuperación dividido por el esfuerzo aplicado. Las especificaciones para este ensayo se presentan en la Tabla 1.

Parámetros del ensayo:

- Asfalto envejecido en el RTFO.
- Equipo Reómetro dinámico de corte DSR, plato de 25 mm, 1 mm de espesor.
- Niveles de esfuerzo, 100 Pa y 3200 Pa.
- Esfuerzo aplicado por 1 segundo, recuperación de 9 segundos.
- Diez ciclos para cada nivel de esfuerzos
- Temperatura de servicio

Parámetros reportados

- Promedio del porcentaje de recuperación a los 100 Pa y 3200 Pa
- Diferencia porcentual entre la recuperación a los 100 Pa y los 3200 Pa
- El Creep compliance (J_{NR}) a los 100 Pa y 3200 Pa
- Diferencia porcentual entre el J_{NR} a 100 Pa y 3200 Pa

Tabla 1: Especificaciones para el ensayo de MSCR

Condición	$J_{NR@3.2MPa}$	$(J_{NR@3.2MPa} - J_{NR@0.1MPa})$
		$J_{NR@0,1 MPa}$
Tránsito estándar (<10mill ESALs)	< 4	< 0,75
Tránsito alto (10 a 30 mill ESALs)	< 2	< 0,75
Tránsito muy alto (> 30 mill ESALs)	< 1	< 0,75

Repeated Creep (CR) o Recuperación elástica mediante esfuerzo repetido

Este ensayo se encuentra especificado bajo el reporte NCHRP 459 Apéndice 4 y fue diseñado para determinar la resistencia a la deformación permanente ante cargas repetidas simulando el tránsito. El ensayo utiliza el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) para llevar a cabo el ensayo de esfuerzo cortante repetido bajo condiciones de temperatura y carga típicas del pavimento en el campo. Este método permite determinar la componente viscosa de la rigidez.

La deformación permanente de un pavimento es producto de la acumulación de deformación no recuperable ante la aplicación de cargas repetidas de tráfico y la contribución del asfalto puede ser evaluado mediante la aplicación de cargas repetidas. Mediante la selección de los periodos de carga y descarga se puede modelar efectivamente las velocidades del tráfico y las diferentes condiciones de cargas de tránsito mediante los rangos de esfuerzos aplicados. La componente viscosa de la rigidez es un indicador de la resistencia que tiene un asfalto a deformarse permanentemente y puede ser utilizada para comparar, evaluar y seleccionar asfaltos.

Parámetros del ensayo:

- Asfalto sin envejecer
- Equipo Reómetro dinámico de corte DSR, plato de 25 mm, 1 mm de espesor.
- Niveles de esfuerzo entre 25 Pa y 300 Pa.
- Esfuerzo aplicado por 1 segundo, recuperación de 9 segundos.
- Cien ciclos de carga
- Temperatura de servicio

Parámetros reportados

- Porcentaje de deformación unitaria residual (% ϵ)

Recuperación elástica (RE)

Este ensayo se encuentra especificado bajo la norma AASHTO T 301-99 y fue diseñado para determinar la recuperación elástica de un material asfáltico mediante el uso de un ductilímetro y especímenes en briquetas. El espécimen es elongado a una velocidad de 5 cm/min y una temperatura de 25 °C, luego se detiene a una separación específica de 20 cm. Hecho esto, el material es cortado en el centro del hilo y se le permite recuperarse por un periodo de una hora. El material debe cumplir con una recuperación mínima de 65 %.

Esquema de la Investigación

Como se indicó en los apartados anteriores el objetivo de este proyecto se enfoca en analizar diferentes tipos de aditivos, dentro de los que se encontraban 3 polímeros SBR (Estireno-Butadieno-Caucho) y 2 polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), los primeros corresponden a polímeros de consistencia líquida algunos utilizados actualmente en Costa Rica mediante un proceso de modificación en planta de producción de mezcla asfáltica en caliente, mientras que los SBS son sólidos para los cuales se requeriría implementar en el país nueva infraestructura capaz de producir asfaltos modificados con estas características. Cada uno de estos asfaltos fue dosificado a un 2,5 % y luego caracterizado mediante parámetros convencionales y además evaluados con los ensayos propuestos (PG, MSCR, CR y RE) para asfaltos modificados con el fin de discriminar entre asfaltos con propiedades y comportamientos diferentes.

Como parte del estudio se evaluó el efecto de un condicionamiento del asfalto modificado (160 °C, 24 horas) simulando un periodo de almacenamiento en tanque luego de su modificación y el caso contrario en el que el asfalto es utilizado inmediatamente después de ser modificado, por otra parte las muestras fueron ensayadas luego de diferentes periodos de reposo (temperatura ambiente) con el fin de evaluar si existía un efecto o reacción del polímero luego de ser fabricada la mezcla asfáltica. Para esta última etapa fueron analizados únicamente 3 aditivos: SBR(A); SBR(C) y SBS(A).

RESULTADOS OBTENIDOS

Etapa 1: Caracterización de los Asfaltos Modificados con Polímeros de Acuerdo con Parámetros Reológicos

En la tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos reológicos para el asfalto original y modificado con los 5 tipos de polímeros, el objetivo de esta etapa fue evaluar el efecto de los diferentes polímeros en las propiedades del asfalto, el análisis de estos resultados se presenta en la siguiente sección.

Tabla 2: Caracterización de asfaltos de acuerdo con parámetros reológicos

		AC-30	SBR (A)	SBR (B)	SBR (C)	SBS (A)	SBS (B)	
Viscosidad DSR a 60 °C (poise)		2854±37	4312±2	5698±4	5542±12	8054±4	6069±2	
Creep % de deformación a 250 ciclos (70 °C) (% deformación)		26312	15777	11147	8342	7167	4121	
G*/sen δ ≥ 1 KPa (70 °C)		0,8921	1,4209	1,5243	1,9679	2,7242	2,0407	
Clasificación	G*/sen δ ≥ 1 KPa	64 ↑	70 →	70 →	76 ↓	76 →	76 ↓	
G*/sen δ ≤ 5 KPa (22°C)		4,1426	4,6038		1,386	5,8858	4,0616	
Clasificación	G*/sen δ ≤ 5 KPa	22	22	-	-	25	22	
Recuperación elástica (%)	Original	5 mín.	-	22,2±0,6	48±5	35±2	33±3	67,7±0,6
		60 mín.	-	31,3±0,8	73±3	53±3	46±5	78,5±0,5
	RTFO	5 mín.	-	25±1	-	32,5±0,1	26,7±0,6	63,00±0,01
		60 mín.	-	37,50±0,01	-	48,3±0,4	40,7±0,6	76,50±0,01
MSCR	$\frac{J_{NR_{3,2}} - J_{NR_{0,1}}}{J_{NR_{0,1}}} < 0.75$		-	0,32	-	0,37	0,26	0,33
	Jnr. 3.2		-	3,896	-	3,284	1,575	0,510
	Clasificación		-	Estándar	-	Estándar	Alto	Muy Alto
		-	Jnr3.2<4	-	J _{NR3,2} <4	J _{NR3,2} <2	J _{NR3,2} <1	

Etapa 2: Efecto del Condicionamiento y Tiempo de Reposo en las Propiedades de los Asfaltos Modificados

En la tabla 3 se presentan los resultados de los ensayos reológicos para el asfalto original y modificados con los 3 tipos de polímeros, el objetivo de esta etapa fue evaluar el efecto de un condicionamiento y tiempos de reposo del asfalto en donde pudieran existir posteriores reacciones y cambios en las propiedades de los asfaltos modificados, el análisis de estos resultados se presenta en la siguiente sección.

Tabla 3: Efecto del condicionamiento y tiempo de reposo en las propiedades reológicas de los asfaltos

	Edad de Reposo	Condicionamiento	SBR (A)	SBR (C)	SBS (A)
G* / sen δ (76 °C)	0 hr	-	1,1676	1,0819	1,209
	48 hr	-	1,2329	1,1267	1,481
	96 hr	-	1,0755	1,2684	1,400
	0 hr	24hr a 160 °C	0,9695	1,1648	1,333
	48 hr	24hr a 160 °C	1,1385	1,2416	1,340
Creep repetitivo (% deformación)	0 hr	-	6781	15298	18602
	48 hr	-	5448	15384	16341
	96 hr	-	8393	10534	15015
	0 hr	24hr a 160 °C	21960	9768	17005
	48 hr	24hr a 160 °C	15281	8996	15784
MSCR (RTFOT) $\frac{J_{NR_{3,2}} - J_{NR_{0,1}}}{J_{NR_{0,1}}} < 0.75$	0 hr	-	0,3183	0,4426	0,2566
	0 hr	24hr a 160 °C	0,3663	0,5216	0,3518
J _{NR3,2}	0 hr	-	3,988	2,689	2,625
	0 hr	24 hr a 160 °C	2,794	1,797	2,244
Recuperación elástica (RTFO)	0 hr (5 min)	-	-	37,0	35,0
	0 hr (60 min)	-	-	62,5	46,0
	96 hr (5 min)	-	-	40,0	30,0
	96 hr (60 min)	-	-	64,5	45,0
	0 hr (5 min)	24hr a 160 °C	37,5	50,0	45,0
	0 hr (60 min)	24hr a 160 °C	50,0	72,5	55,5
	72 hr (5 min)	24hr a 160 °C	26,5	51,0	44,0
	72 hr (60 min)	24hr a 160 °C	41,5	73,0	56,5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Etapa 1: Caracterización de los Asfaltos Modificados con Polímeros de Acuerdo con Parámetros Reológicos

Uno de los objetivos medulares de este proyecto consistió en valorar cual de los polímeros analizados mejoraba en mayor medida las propiedades reológicas de los asfaltos a una misma tasa de dosificación, lo anterior se evaluó tomando en cuenta que el “Grado de Desempeño” (PG) el cual no siempre logra discriminar entre asfaltos con comportamientos diferentes. En este sentido se presentan en la Figura 1 el gráfico correspondiente a los resultados del parámetro G*/senδ (PG) medido a 70 °C como parámetro correlacionado con la susceptibilidad del asfalto a deformarse, entendiendo que entre mayor sea su magnitud menos susceptible es a la deformación.

De esta figura podemos interpretar que el asfalto modificado con el SBS(A) es quien presenta mejores condiciones seguido por los polímeros SBS(B) y SBR(C). En general los polímeros SBS tienden a presentar un mejor desempeño que los polímeros SBR y como es de esperar el asfalto sin modificar (AC30) es el que presenta de acuerdo con este parámetro mayor susceptibilidad a deformarse.

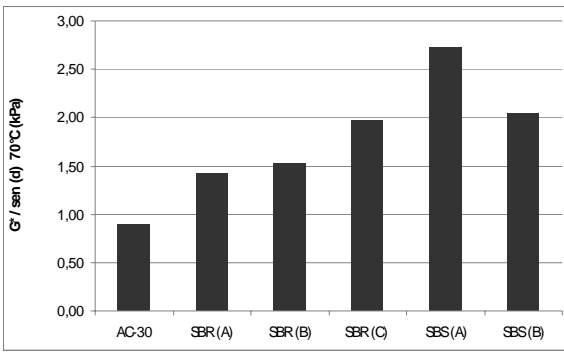


Figura 1: G*/senδ para cada polímero

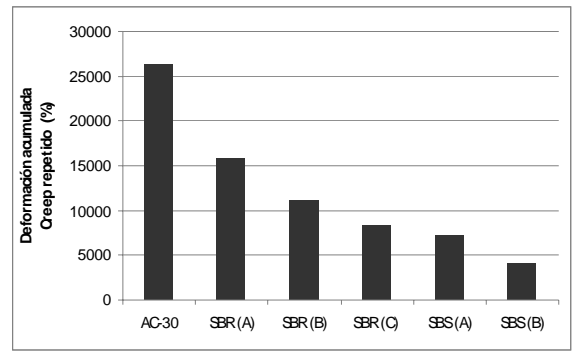


Figura 2: Deformación acumulada permanente

Como parte de los ensayos propuestos como candidatos a utilizarse para evaluar asfaltos modificados se plantea en la Figura 2 el ensayo de esfuerzo repetido o “creep repetido”, este parámetro mide la deformación permanente acumulada; indicador también de la susceptibilidad de asfalto a deformarse o de recuperar elásticamente luego de aplicar un esfuerzo, por lo tanto entre mayor sea el valor numérico, menor es la resistencia a la deformación. Es importante apuntar que pese a que los resultados presentan en su mayoría la misma tendencia que el G*/senδ (PG), es en este caso el SBS(B) quien obtiene la mejor “calificación” dentro de los polímeros analizados.

Esta misma tendencia se presenta en la Figura 3 correspondiente al MSCR, ensayo que sigue el mismo principio que el Creep repetido, la diferencia principal radica en la aplicación de varios.

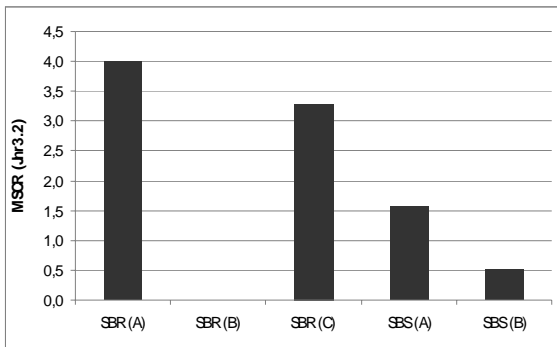


Figura 3: MSCR (Jnr 3.2MPa)

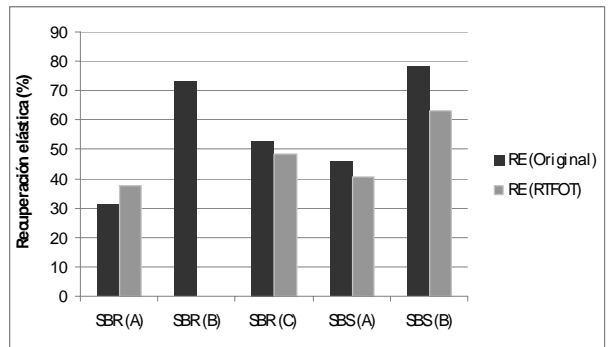


Figura 4: Recuperación elástica

esfuerzos de análisis, por otra parte a nivel internacional este procedimiento es reconocido como una evolución al creep repetido y cuenta con especificaciones para diferentes niveles de tránsito. Para este ensayo no fue posible evaluar el polímero SBR(B) ya que no se logró su envejecimiento en el horno RTFO.

En la figura 4, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de recuperación elástica para las condiciones original y envejecida en el horno RTFO, en este caso el polímero SBS(B) fue quien obtuvo el mejor rendimiento, seguido por el SBR(B) sin embargo durante su análisis se evidenció un efecto de separación de fases, de la cual se comentará más adelante, los polímeros SBR(C), SBS(A) y SBR(A) ocuparon los siguientes puestos en el orden dictado.

Etapa 2: Efecto del Condicionamiento y Tiempo de Reposo en las Propiedades de los Asfaltos Modificados

Dentro del esquema del proyecto se propuso analizar dos situaciones: la primera el efecto de un condicionamiento al asfalto modificado (24 horas a 160 °C) y la segunda, de un tiempo de reposo luego de ser modificado el asfalto. El primero intenta simular la situación en la cual el asfalto es modificado y almacenado antes de ser utilizado en la fabricación de una mezcla asfáltica, y el segundo intenta verificar si existe una variación en las propiedades del asfalto que pudieran ser producto de reacciones o enlaces posteriores a la fabricación de la mezcla asfáltica; dando al asfalto modificado un reposo a temperatura ambiente y un posterior análisis de sus propiedades. Esta etapa en el estudio se incluye ya que en evaluaciones anteriores se comprobó una variación importante de las propiedades de asfaltos modificados en los cuales las únicas variables no controladas fueron el tiempo de reposo y el tiempo de condicionamiento.

Antes de iniciar el análisis de esta etapa se debe tener presente que el asfalto modificado con el polímero SBR(A) presentó una separación de fases luego del proceso de condicionamiento de 24 hr a 60 °C y en algunos casos luego del periodo de reposo, con evidente apariencia gelatinosa en gran parte del volumen de asfalto que podría interpretarse como acumulación del polímero, el resto del asfalto presentaba una condición bastante fluida. Este mismo efecto fue evidente durante la primera etapa en el asfalto modificado con el polímero SBR(B) el cual no fue evaluado en esta segunda etapa sin embargo esta condición podría estar asociada a algunos resultados obtenidos.

En las Figuras 5 a la 8 se presentan los resultados obtenidos por los tres polímeros estudiados en esta etapa a diferentes condicionamientos y tiempo de reposo. Analizando los resultados

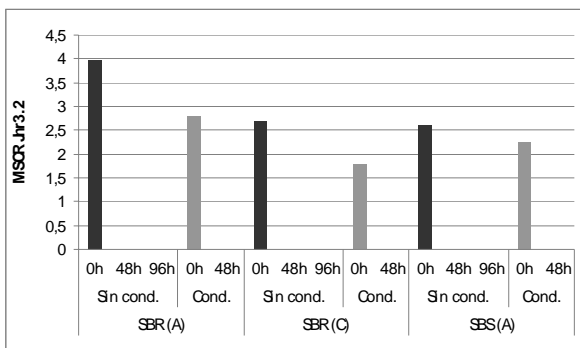


Figura 5: MSCR (Jnr 3.2MPa)

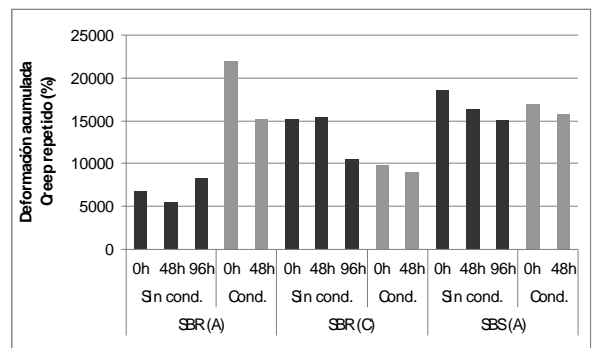


Figura 6: Deformación acumulada

obtenidos para el MSCR Jnr 3.2 MPa se puede observar como existe para todos los polímeros una evidente mejoría del desempeño del asfalto luego de ser sometido al condicionamiento (24h a 160°C) esto podría interpretarse indicando que durante este proceso se generan una serie de reacciones o enlaces de los polímeros dentro del asfalto que le hacen mejorar sus propiedades.

Este efecto es evidente también en el ensayo de Creep repetido en donde se observa una mejoría de las propiedades del asfalto evidente en la reducción de la deformación permanente acumulada, se debe aclarar que el SBR(A) presentó un comportamiento aleatorio y contrario, sin embargo este puede ser explicado por la separación de fases que se trató anteriormente.

Otro punto a destacar evaluado para este ensayo es el efecto del tiempo de reposo, en donde se puede observar como existe una mejoría a la deformación paulatina, conforme se aumenta el tiempo luego de ser modificado el asfalto. Se debe notar que los resultados obtenidos para el asfalto condicionado son equivalentes a los resultados obtenidos luego de periodo de reposo de 96 horas.

Las observaciones realizadas para los ensayos anteriores son también aplicables para el ensayo de PG en donde se observa la mejoría producto del condicionamiento así como del tiempo de reposo, siendo equivalentes los resultados obtenidos luego del periodo de reposo 96h con los resultados para los polímeros condicionados 24 hr a 160°C. El resultado de polímero SBR(A) siguen siendo aleatorios y contrarios a la tendencia.

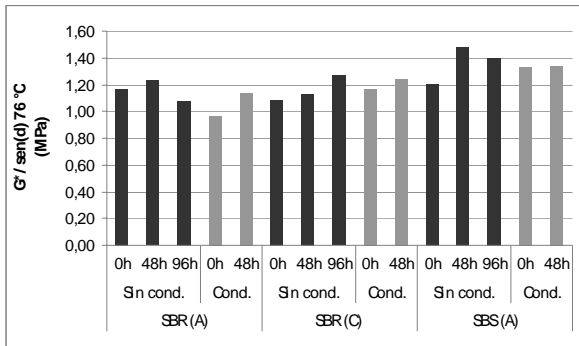


Figura 8: G*/senδ

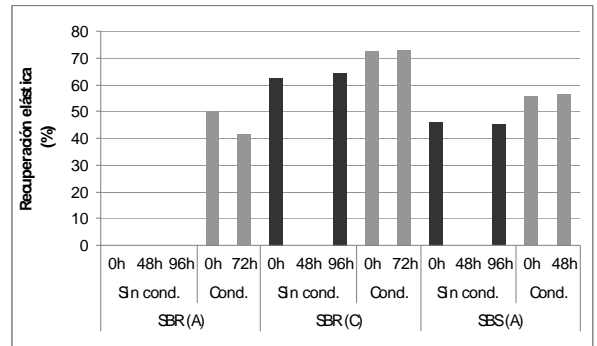


Figura 7: Recuperación elástica

Por último en relación con el ensayo de recuperación elástica se puede observar que si se presenta la mejoría producto del condicionamiento de la muestra sin embargo no es evidente la mejoría producto del tiempo de reposo.

COMENTARIOS FINALES

Los métodos propuestos para evaluar asfaltos modificados son un buen recurso o herramienta para discriminar entre asfaltos con propiedades y comportamientos diferentes y complementan la metodología de Grado de desempeño en la caracterización de asfaltos modificados.

Los ensayos de CR y MSCR presentaron una alta correlación, como se ha visto el MSCR presenta una clasificación de acuerdo a las condiciones de tránsito, la cual es una herramienta valiosa en la interpretación de resultados.

El ensayo de recuperación elástica es un ensayo recomendado para su implementación como ensayo complementario a los ensayos reológicos por presentar resultados coherentes con los obtenidos en los ensayos de RE y MSCR, los cuales requieren una gran inversión en equipo (reómetro dinámico de cortante DSR) en contraposición de los equipos utilizados para este ensayo que son de mucho menor costo y que se podrían catalogar como equipo convencional en un laboratorio de asfaltos (ductilímetro). Sin embargo se debe tener presente que la información brindada por los ensayos reológicos es mucho más completa al simular las condiciones reales del asfalto.

Es evidente el efecto del condicionamiento y tiempo de reposo en las propiedades y desempeño de los asfaltos modificados con polímeros, por lo tanto se recomienda un estricto

control de estas variables durante un análisis. Con base en los resultados obtenidos se recomienda evaluar los asfaltos modificados luego de un procedimiento de condicionamiento de 24 horas a 160 °C.

Para aquellos polímeros en los cuales se presente una separación durante el periodo de curado se deberá replantear el proceso de análisis, se recomienda en estos casos que los ensayos sean realizados evitando el condicionamiento, analizando los asfaltos luego de un proceso de reposo de 96 horas, en caso de que persista la separación el ensayo deberá realizarse inmediatamente después de ser preparado.

REFERENCIAS

- Salazar, J. (2008). Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta. Unidad de Investigación en Infraestructura Vial. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. San José, Costa Rica.
- Hitti, E. (2009). Producción de asfaltos modificados en plantas de mezcla asfáltica en caliente. Curso de participación. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- BASF (2009). Experiencias en el mejoramiento de asfaltos con SBR. Artículo técnico.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 315-05. Transportation, Materials and Methods of Sampling and Testing, AASHTO, EUA, 2006.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 301-99. Transportation, Materials and Methods of Sampling and Testing, AASHTO, EUA, 2008.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO TP 70-07. Transportation, Materials and Methods of Sampling and Testing, AASHTO, EUA, 2008.