

MODIFICACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE CON EMULSIÓN DE SBR

H. Gerardo Botasso, J. Julián Rivera
LEMaC, Centro de Investigaciones Viales. UTN La Plata
La Plata, Argentina
lemac@frlp.utn.edu.ar

German Spinelli
BASF Argentina
Buenos Aires, Argentina
german.spinelli@basf.com

Resumen

En los países de la región se registra el uso difundido del Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), como principal agente modificador de los cementos asfálticos en caliente. Esto se debe en parte a la gran afinidad que presenta con los cementos asfálticos ante temperaturas y cillazamiento adecuados en su proceso de modificación. Pero en la actualidad la tecnología vial se encuentra frente al desafío de disminuir los consumos de energía en los procesos de generación de las mezclas asfálticas, promoviendo la exposición de los asfaltos a condiciones menos severas de temperatura, preocupando en la región, que los proveedores de asfalto modificado no siempre cuenten con instalaciones adecuadas, que garanticen una correcta dispersión del polímero y la estabilidad del producto durante su traslado y manipulación en planta. Por lo expuesto, diseñar procesos que involucren menores temperaturas de trabajo, menor complejidad en la planta modificadora y la adición del polímero “in situ”, son objetivos a abordar. En el presente trabajo, se diseña una instalación que permite, a escala de laboratorio e industrial, adicionar polímeros de manera estable en un cemento asfáltico en caliente “in situ”, cumpliendo con las normativas vigentes de clasificación de los asfaltos modificados y su reología. Para ello se ha utilizado un polímero Estireno-Butadieno-Rubber (SBR) en forma de emulsión y un proceso de mezclado que reemplaza los molinos dispersores por un mezclado de baja acción mecánica. Se establece una rutina de investigación que permite realizar las comparaciones entre dos cementos asfálticos modificados, uno con SBS y otro con emulsión de SBR a nivel de ligante y de prestación de una mezcla asfáltica del tipo densa. Se presentan las valoraciones realizadas sobre ambos sistemas, los diseños de dispersión de laboratorio, y un modelo de instalación industrial, que permiten garantizar un umbral de prestación compatible con las exigencias de los Pliegos de Especificaciones Técnicas.

Resumo

A região é comum usar como modificador de asfalto a quente de estireno-butadieno-estireno (SBS). Isto é em parte devido à afinidade do asfalto com temperaturas cillazamiento adequada e um processo de modificação. Mas agora o estado tem de reduzir o consumo de energia na geração de misturas de asfalto, asfalto promover a exposição a condições de temperatura menos graves. Na região ainda mais os fornecedores de asfalto modificadas nem sempre dispõem de

instalações adequadas para a dispersão de polímero e a estabilidade do produto durante o transporte e utilização na planta. Para que este processo seja desenvolvido com temperaturas mais baixas, menos complexidade na modificação e da adição do polímero "in situ". Neste trabalho nós projetamos uma instalação que forma estável incorporar polímeros em um asfalto quente "in situ", tanto no laboratório e na indústria, atendendo aos padrões de classificação e reologia asfaltos modificados. Ele tem sido usado para uma emulsão de estireno-butadieno (SBR) e uma dispersores mistos moinhos substituindo uma baixa acção mecânica. A pesquisa permite comparações entre os dois asfalto modificado, com um e com um SBR SBS e a sua utilização numa mistura de asfalto. Apresentamos os resultados em ambos os sistemas, modelos de dispersão de laboratório e modelo de fábrica, permitindo assegurar a prestação de acordo com os requisitos das especificações de Licitação.

INTRODUCCION

Los asfaltos modificados para uso en caliente suelen ser producidos en plantas mediante la incorporación a un asfalto convencional base de un polímero del tipo SBS, el cual es un elastómero de tipo radial tribloque. Este tendrá un desempeño óptimo tanto a bajas como a altas temperaturas, reduciendo los riesgos de fisuración térmica, fisuración por rigidez y de ahuellamiento, pero deberá ser adquirido en volúmenes prefijados y almacenado por diversos periodos a temperatura con recirculación, de acuerdo a su tasa de empleo.

Por otro lado existen en el mercado polímeros modificadores del tipo SBR, que es un elastómero de configuración lineal, los que se presentan como una emulsión en agua, lo cual hace que se hayan empleado desde hace años como modificadores de emulsiones asfálticas (Rodríguez Talavera, 2000). Este producto también puede ser empleado en la modificación de asfaltos en caliente directamente en la planta asfáltica, con un equipamiento mínimo y permitiendo la modificación de la cantidad de asfalto que se vaya requiriendo de acuerdo a la demanda, obteniéndose un producto que clasifica según la normativa IRAM correspondiente como AM-3 (calificación necesaria para su empleo en mezclas asfálticas modificadas). El presente trabajo aborda la experiencia llevada adelante y los resultados obtenidos que permiten arribar a esta afirmación.

MATERIALES Y METODO

Puede expresarse que se tienen dos familias principales de polímeros de aplicación en asfaltos: los plastómeros y los elastómeros. Las propiedades químicas de cada uno son diferentes al igual que el impacto a esperar de su empleo. Los plastómeros otorgan rigidez al asfalto para contrarrestar la deformación permanente, sobre todo en temperaturas altas. Los elastómeros otorgan rigidez pero también elasticidad, sobre todo en temperaturas bajas o cambiantes que resultan en fatiga. Por lo tanto el polímero mejor indicado en una obra, aparte de lo económico, va a depender de los problemas específicos que enfrente el caminero y las mejoras que se deseen de la modificación (Reyes, 2007). Es generalmente aceptado que los elastómeros pueden mejorar la resistencia a la deformación plástica, a la vez que mejoran, o al menos no perjudican, la resistencia al agrietamiento por fatiga. En general las experiencias con plastómeros son muy positivas en mejoramiento de la resistencia a la deformación plástica a temperaturas altas de operación, pero a veces no son tan favorables en resistencia al agrietamiento por fatiga, a temperaturas intermedias (Rosero y Solarte, 2005).

Se desprende que para la elección de cada tipo de modificador lo mejor es siempre ejecutar ensayos de desempeño para la mezcla a la deformación plástica a altas temperaturas, al agrietamiento por fatiga a temperaturas intermedias a bajas, al agrietamiento térmico y a la susceptibilidad por la humedad. Para ello la implementación de ensayos como los de envejecimiento RTFOT, PAV para las distintas condiciones climáticas, la determinación del G^* y su ángulo de fase por medio del reómetro de corte son fundamentales, mientras que sobre las mezclas producidas se hace necesario considerar ensayos de test de Lottman, Wheel Tracking Test, Estabilidad Remanente y Módulo dinámico.

En el presente trabajo se realizan dos modificaciones de un cemento asfáltico convencional. Por un lado se utiliza un polímero del tipo SBS, que en principio tendrá un desempeño óptimo tanto a bajas temperaturas como a altas temperaturas. Por otro lado se incorpora como modificador un SBR, que como se comercializa en forma de emulsión requiere de un análisis particular para su adición en caliente. Dado el cambio de configuración en la cadena elastomérica se debe evaluar el comportamiento de esta modificación a bajas y a altas temperaturas, tanto en el ligante como en la mezcla que el mismo conforme (Mojica y Hernández, 2005).

Materiales

La emulsión de SBR y el cemento asfáltico para la experiencia reúnen las condiciones de la Tabla 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1: Caracterización de la emulsión de SBR

CARACTERISTICA	VALOR
PH	5,4
Contenido de coágulos	0,0039 % en peso
Densidad	7,87 lb/gal (0,943 g/cm ³)
Viscosidad Brookfield	1200 cP
Sólidos	64,6 % en peso

Tabla 2: Caracterización del cemento asfáltico base

CARACTERISTICA	VALOR
Clasifi. por viscosidad (según IRAM 6835)	CA-20
Nº de Lote	2B2M404
Punto de Ablandamiento (IRAM 6841)	48 °C
Viscosidad a 60 °C (IRAM 6837)	2470 dPa.seg
Indice de Penetración (IRAM 6604)	-1,3

Para el análisis comparativo se decide además emplear cemento asfáltico modificado de presentación comercial, cumpliendo con los datos de caracterización de la Tabla 3.

Tabla 3: Caracterización del asfalto con SBS de uso comercial

CARACTERISTICA	VALOR
Clasificación (según IRAM 6596)	AM-3
Penetración (IRAM 6576)	52 .0,1 mm
Punto de Ablandamiento (IRAM 6841)	80 °C
Viscosidad a 170 °C (IRAM 6837)	5,8 dPa.seg
Rec. Elást. Torsional (IRAM 6830)	71 %
Grado PG	76-22
DSR s/m virgen a 76 °C (G^* , δ □ □ $G^*/\text{sen } \delta$ □)	1,05 kPa, 66,5°, 1,15 kPa
DSR s/m envejecida RTFOT a 76 °C (G^* , δ □ □ $G^*/\text{sen } \delta$) □	2,56 kPa, 68,8°, 2,74 kPa

Metodología de aditivación

Luego de varias experiencias guiadas por experiencias previas relacionables a nivel internacional (Vargas et al, 2008), se establece que la modificación óptima en laboratorio del cemento asfáltico convencional CA-20 (Figura 1), reúne las características de la Tabla 4.

Tabla 4: Aditivación en laboratorio

CARACTERÍSTICA	VALOR
Metodología de mezclado	Agitación mecánica con paletas a 300 RPM
Recipiente de aditivación	Baño de aceite termostatzado, diám. 12 cm
Cantidad de cemento asfáltico	1000 g
Contenido de SBR residual	5 %
Acondicionamiento asfalto	En vaso de precipitado en estufa hasta 170 °C
Acondicionamiento emulsión de SBR	En recipiente cerrado a temperatura ambiente
Tiempo aditivado emulsión de SBR	13 minutos
Tratamiento posterior	Agitación hasta cumplir 1 hora y se mantiene 1 hora más a 140 °C

Figura 1: Aditivación con emulsión de SBR en laboratorio



RESULTADOS

Análisis sobre la muestra de asfalto modificado

La caracterización del producto resultante es la que se observa en la Tabla 5.

Tabla 5: Caracterización del asfalto modificado en laboratorio

Determinación	Unidad	AM-3 s/norma	CA-20 + 5 % SBR residual
Penetración (IRAM 6576)	0,1 mm	50-80	51
Pto. De Ablandamiento (IRAM 6841)	°C	>65	69
Rec. Elast. Torsional (IRAM 6830)	%	>70	71
Resultados luego de ensayo de Estabilidad al Almacenamiento			
Diferencia de Pto. de Abl. (IRAM 6841)	°C	<5	0
Diferencia de Penetración (IRAM 6576)	0,1 mm	<10	2
Resultados luego de ensayo de Residuo de Película Delgada (RTFOT)			
Variación de masa (IRAM 6839)	%	<1	0,034
Penetración residual (IRAM 6576)	%	>65	86,3
Variación Pto. de Abl. (IRAM 6841)	°C	-5 a +10	0

Dada la clasificación como AM-3, se procede a caracterizar al mismo mediante SUPERPAVE, para valorar el comportamiento del ligante a altas, medias y bajas temperaturas, obteniendo como resultado final el Grado de Performance (PG). El procedimiento, comienza con la determinación del Punto de Inflamación y la Viscosidad a 135 °C sobre el Ligante Original. Se determina el Factor de Ahuellamiento como el cociente entre el Módulo Complejo de Corte (G^*) y el seno del Angulo de Fase (δ), establecidos mediante el ensayo Dynamic Shear Rheometer (DSR). Se le realizan al ligante dos procesos de envejecimiento: en el Rolling Thin Film Oven Tester (RTFOT) y en el Pressure Aging Vessel (PAV). Ambos simulan el envejecimiento en planta y en servicio del ligante, respectivamente. Después de pasar por el RTFOT se determina el Factor de Ahuellamiento como el cociente entre el G^* y el seno de δ . Finalmente para medias y bajas temperaturas sobre el asfalto envejecido en el RTFOT y luego en el PAV se determina el Factor de Fisuración por Fatiga como el producto entre el G^* y el seno de δ . Con el Bending Beam Rheometer (BBR), sobre el asfalto en estas mismas condiciones, se determina el Módulo de Rigidez del ligante envejecido (Lucena et al, 2003). Los resultados logrados se ven en la Tabla 6.

Tabla 6: Caracterización SPERPAVE del asfalto modificado en laboratorio

<i>Asfalto original</i>			
Punto de Inflamación (AASHTO T-48)	[°C]	min. 230	231
Viscosidad a 135 °C (IRAM 6837/11) ¹	[dPa.s]	max. 30*	31,0*
Ensayo de corte dinámico (AASHTO T-315)			
Factor de ahuellamiento " $G^*/\sin(\delta)$ "	[kPa]	min. 1,00	1,32
Temperatura	[°C]		76
<i>Residuo RTFOT (AASHTO T-240)</i>			
Ensayo de corte dinámico (AASHTO T-315)			
Factor de ahuellamiento " $G^*/\sin(\delta)$ "	[kPa]	min. 2,20	3,25
Temperatura	[°C]		70
<i>Residuo PAV (AASHTO R-28)</i>			
Ensayo de corte dinámico (AASHTO T-315)			
Factor de fisuración por fatiga " $G^*.\sin(\delta)$ "	[kPa]	max. 5000	954
Temperatura	[°C]		28
Reómetro de flexión (AASHTO T-313)			
Módulo de Rigidez	[MPa]	max. 300	78,29
Valor - m		min. 0,300	0,325
Temperatura	[°C]		-12

GRADO DE PERFORMANCE 70-22

¹ La incertidumbre de este ensayo para el laboratorio es de $\pm 7\%$. Para el cálculo de la incertidumbre expandida U se emplea el método descrito en el reporte TR 537 del Nordtest en su versión 1.3 de octubre de 2003.

Análisis del empleo del cemento asfáltico modificado en mezclas asfálticas

Se procede al análisis de incorporación del asfalto modificado en laboratorio en una mezcla asfáltica. Se ha seleccionado para el análisis una mezcla CAC-D20, según la clasificación de la Especificaciones Técnicas para Mezclas en Caliente de la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina, publicación que se considera incluye los más modernos lineamientos en tal sentido. Esta mezcla se puede diseñar tanto con cemento asfáltico convencional como con cemento asfáltico modificado, lo cual la torna ideal para este estudio en particular, además de representar una tipología de mezcla, por sus parámetros físicos y mecánicos, representativa de las que se utilizan en la enorme mayoría de las pavimentaciones en Argentina. Las determinaciones efectuadas son:

- **Vacíos, Estabilidad y Fluencia Marshall** (además de Densidad Marshall, Relación E/F, VAM y la Relación B/V, que complementan el análisis).
- **Ahuellamiento por Wheel Tracking Test:** No se encuentra especificada con límites de aceptación o rechazo, pero permite comparaciones relativas de desempeño de diversas mezclas asfálticas (Figura 2).
- **Análisis de adherencia:** Para predecir el comportamiento de las mezclas en obra mediante el Test de Lottman Modificado (AASHTO 182 modificada). Se establece una resistencia conservada por encima del 80 % como umbral de aceptación (Figura 3).
- **Análisis de respuesta estructural mediante Módulo Dinámico:** Para estudiar la respuesta estructural ante la acción de cargas dinámicas del tránsito, según la normativa UNE-EN12697-26 (Figura 4). En este caso se ha efectuado el análisis sobre probetas Marshall, estableciéndose para el estudio las siguientes combinaciones de frecuencia y temperatura:
 - Temperatura baja (5 °C) y frecuencia alta (5 Hz), se representa un estado frágil ante una sollicitación a alta velocidad.
 - Temperatura intermedia (20 °C) y frecuencia intermedia (1 Hz), se representa una situación intermedia de trabajo.
 - Temperatura intermedia/alta (40 °C) y frecuencia baja de (0,1 Hz), se representa una situación de temperatura intermedia/alta con acción de un tránsito lento.

Para las mezclas con asfalto convencional y asfalto modificado comercial AM-3 se utilizó un contenido de 4,8 % de asfalto, para la mezcla con asfalto modificado con SBR se empleó un contenido de asfalto del 5,2 %, en cada caso este es el contenido óptimo determinado por el análisis Marshall de al menos 4 contenidos. Los resultados se observan en la Tabla 7.

Figura 2: Ensayo Wheel Tracking Test

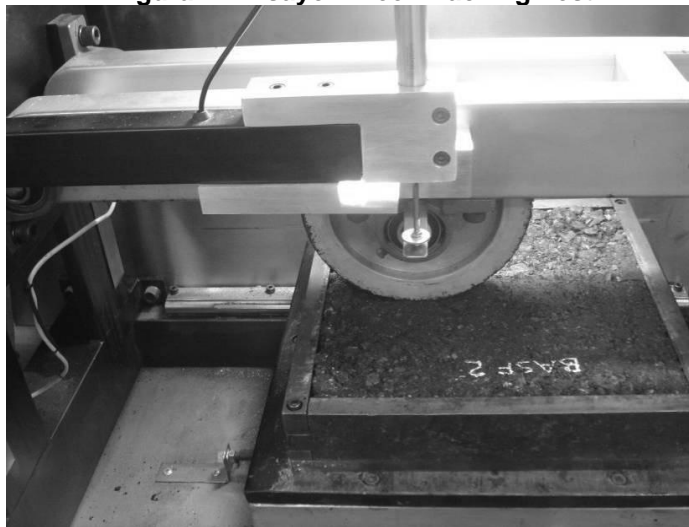


Figura 3: Test de Lottman Modificado

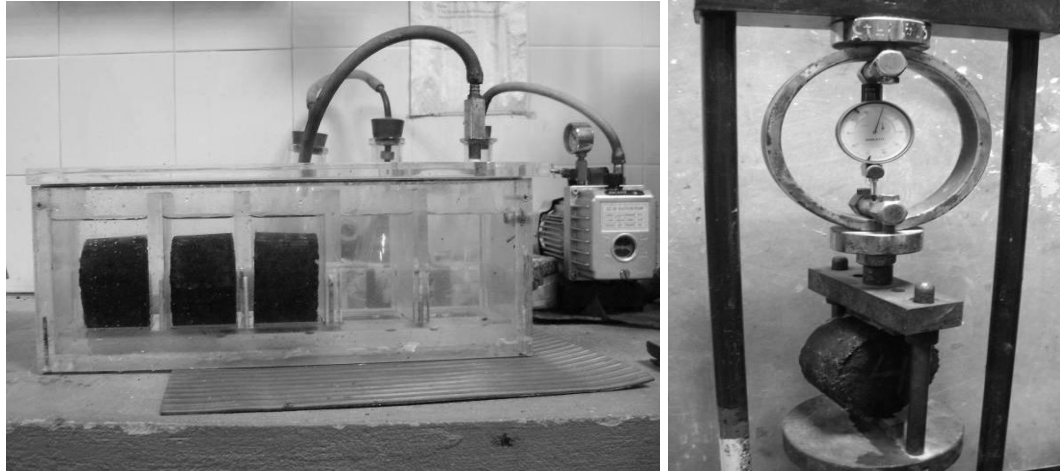


Figura 4: Módulo Dinámico sobre probetas y testigos

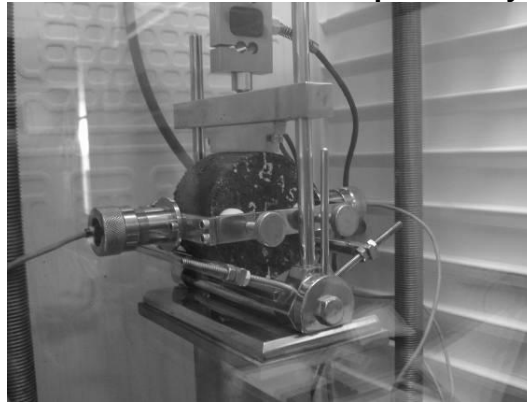


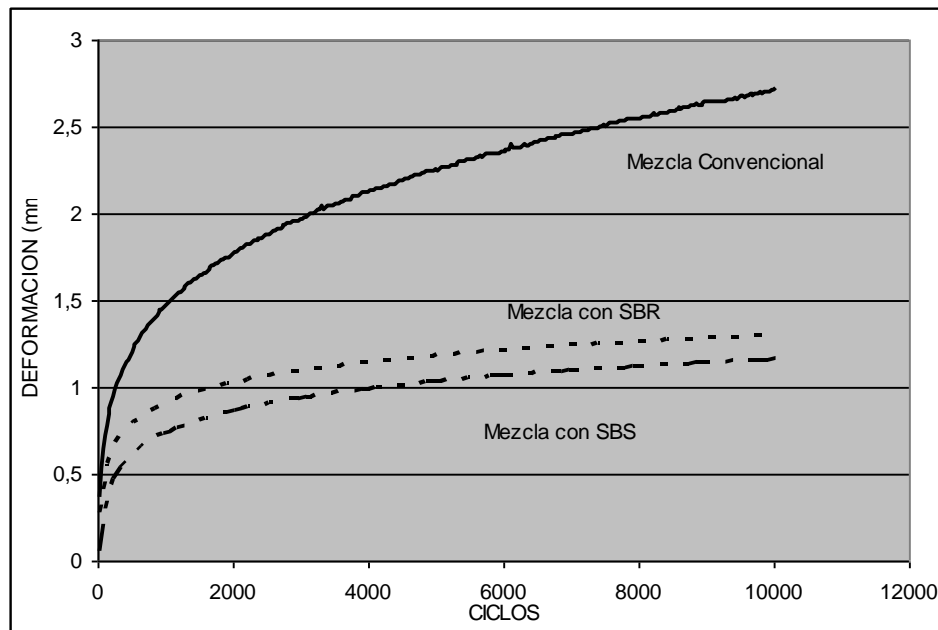
Tabla 7: Resultados sobre las mezclas asfálticas

	DETERMINACION	Conv.	SBS	SBR
MARSHALL	Estabilidad (kg)	1121	1256	1212
	Fluencia (mm)	2,8	3,8	3,6
	D. Marshall (g/cm ³)	2,327	2,318	2,298
	D. Rice (g/cm ³)	2,428	2,412	2,411
	Vacios (%)	4,2	3,9	4,7
WTT	D. Probeta (g/cm ³)	2,295	2,290	2,287
	Vacios (%)	5,4	5,0	5,1
	Coef. Compactación (%)	98,6	98,8	99,5
	WTS (mm.10-3ciclos)	0,094	0,030	0,026
	RD (mm)	2,72	1,18	1,31
	PRD (%)	5,44	2,36	2,62
LOTTMAN MODIFICADO	Resist. sin acondicionar (kg/cm ²)	7,8	10,7	9,5
	Resist. acondicionada (kg/cm ²)	7,5	10,6	8,7
	Relación TSR (%)	96,2	99,0	91,6
MODULO DINAMICO	E* a 5 °C y 5 Hz (Mpa) / Δ% de E* _{CA-30} (%)	29598	37666 (27,3)	31243 (5,6)
	E* a 20 °C y 1 Hz (Mpa) / Δ% de E* _{CA-30} (%)	7233	8948 (23,7)	8245 (14,0)
	E* a 40 °C y 0,1 Hz (Mpa) / Δ% de E* _{CA-30} (%)	703	1588 (125,9)	1147 (63,2)

En la Tabla 7 algunos resultados demuestran que se trata de mezclas asfálticas comparables entre si (Vacíos, Densidad Marshall, Densidad Rice, Fluencia, Adherencia, etc.), mientras otros permiten establecer en cuanto a prestaciones como existe una tendencia a ubicar a la modificación con SBR en un punto próximo a los valores alcanzados con el AM-3 comercial, y superior a los obtenidos con el CA-30 (Estabilidad, Módulos Dinámicos, RD, WTS y PRD).

En la Figura 5 se han volcado las evoluciones de los ahuellamientos en el Wheel Tracking Test de las tres mezclas en forma comparativa, pudiéndose observar como la mezcla con emulsión de SBR se aproxima fuertemente a la que posee AM-3 comercial, con ahuellamientos muy por debajo de los obtenidos con la mezcla con asfalto convencional.

Figura 5: Comparativo ahuellamiento en WTT



ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL

La modificación de asfalto mediante emulsión de SBR se basa en la dispersión de dos líquidos, siendo la mezcla de dos componentes inicialmente separados. El proceso puede traer aparejado la formación de vórtice con incorporación de aire, importante ya que produce un aumento de formación de espuma y una aceleración de la oxidación del cemento asfáltico, logrando un envejecimiento prematuro. Además se debe efectuar la prevención del flujo circulatorio, debiéndose evaluar las componentes que forman la velocidad del fluido en un punto del tanque. La primera componente es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del agitador. La segunda componente es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje del agitador, mientras que la tercera es tangencial y actúa en dirección tangencial a la trayectoria de rotación del agitador. En una operación de mezclado las componentes útiles y que dan el flujo necesario para una correcta mezcla son las radiales y longitudinales y la componente a evitar es la tangencial, la cual sigue una trayectoria circular alrededor del eje creando un vórtice en la superficie (Coe y Cui, 2003). Estos aspectos se han analizado en el desarrollo del equipamiento a escala industrial.

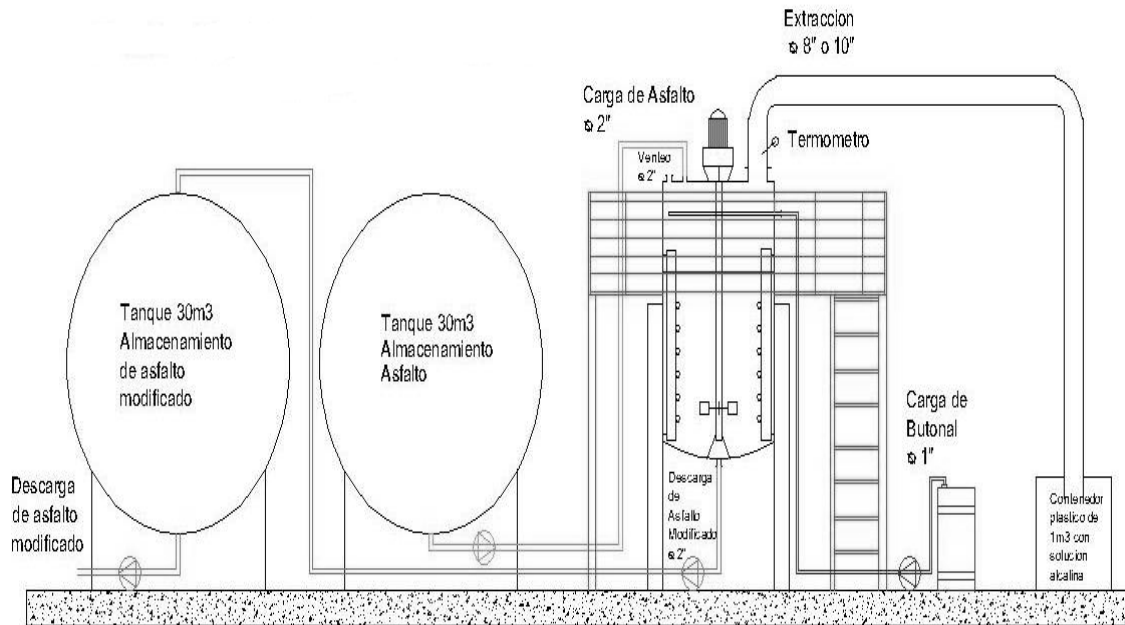
Por otro lado, las etapas del proceso productivo de modificación de cemento asfáltico con emulsión de SBR pueden considerarse en forma conceptual son: “Recepción y almacenamiento

de materias primas”, “Carga de materias primas en el tanque de mezcla”, “Mezcla con calefacción de los componentes” y “Descarga y almacenamiento del producto final”, debiéndose considerar que de este sistema sólo algunos son equipos diferenciales de los que intervienen en el proceso convencional de modificación de asfalto con SBS.

Adicionalmente se considera:

- Se trata de un fluido con una viscosidad promedio de 400 cps (a 140°C), una densidad de 1,000 gr/cm³ y una velocidad de agitación máxima de 200 RPM.
- Una capacidad máxima de 5.000 litros, superada la cual la potencia necesaria es excesiva. Esto permite una producción en Batch, que se relaciona con la forma habitual de presentación de la emulsión de SBR, su grado de dilución, el contenido de modificador necesario en función de la experiencias realizadas y la demanda de cemento asfáltico para el tipo de aplicaciones contemplado, materializable de dos maneras con un mismo equipo:
 - Batch de 2.500 kg con 1 tambor de 200 litros de emulsión de SBR.
 - Batch de 5.000 kg con 2 tambores de 200 litros de emulsión de SBR.
- Un tipo de rodete de turbina de disco con palas, la cual genera un buen flujo de mezclado.

Figura 6: Esquema de mezclador a escala industrial



Se ha estimado que para la producción de un Batch de 2.500 kg calefaccionado por serpentín, incorporando la emulsión de SBR sobre la superficie con un rociador tipo flauta, siendo el mezclado a 200 RPM con un motor con reducción de 7,5 HP con variador de potencia, se requiere para la evaporación del agua de emulsión una energía de 34.290 kcal, siendo la extracción de vapores conducida a un contenedor de 1 m³ con solución alcalina.

CONCLUSIONES

Es posible dispersar una emulsión de SBR en cemento asfáltico en caliente tanto a escala de laboratorio como a escala industrial. A escala de laboratorio se ha podido modificar el asfalto base CA-20 con un contenido de SBR residual del 5 %, usando simplemente un mezclador con

paleta a 300 RPM, en lugar de emplear un dispersor con rotor-estator a más de 5.000 RPM, como sería necesario en el caso de querer realizar la modificación con pelets de SBS. Esta dispersión se realizó a 160-170 °C gracias a un baño de aceite termostatzado, requiriéndose para producir 1 kg de asfalto modificado una hora de mezclado. Se registró como máximo una duplicación del volumen respecto del asfalto original por formación de espuma al liberar el agua de la emulsión, habiendo sido incorporada ésta en un periodo de entre 10 y 15 minutos. A escala industrial esta modificación se determinó es posible realizar con paletas sumergidas en el asfalto replicando la experiencia de laboratorio, reemplazando esto el uso de un molino coloidal de gran tamaño, con tanques de reserva que permitan almacenar el flujo generado por el mismo, como los utilizados en la modificación con SBS.

Con este proceso es posible obtener un asfalto modificado AM-3 según la Norma IRAM 6596 con un PG 70-22 por la metodología Superpave.

Con dicho asfalto modificado se ha podido elaborar una mezcla asfáltica, tipo CAC-D20, con prestaciones de Módulo Dinámico, Resistencia al Ahuellamiento y Adherencia Arido-Ligante, similares a las de un asfalto modificado comercial.

REFERENCIAS

- Coe, D. S., & Cui, Z. H. (2003). Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos. In XII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, Quito (Ecuador), Disponible en www.technopave.com/publications/CILA-2003.
- Lucena, M. C. C., Soares, S. A., & Soares, J. B. (2002). Caracterização e comportamento térmico do asfalto modificado por polímero. In XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, CBECIMAT.
- Mojica, Á., & Hernández, H. (2005). Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 1 (MDC-1) empleando asfalto modificado con Polietileno de desecho (Doctoral dissertation, Tesis de Grado, Universidad Católica de Colombia. 2005. 142p).
- Reyes, F. (2007). Mezclas asfálticas modificados con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). *Infraestructura vial*, 10(17).
- Rodriguez Talavera, R., Castano Meneses, V. M., & Martinez Madrid, M. (2000). Desarrollo de asfaltos modificados con hule SBR para pavimentos de alto desempeño. *Publicación técnica*, (140).
- Rosero, A., & Solarte, R. Cambios en la estabilidad química durante el almacenamiento a corto plazo de un asfalto modificado con el plastómero EASTMAN (EE-2), para uso vial (Doctoral dissertation, Tesis de Grado, Universidad del Cauca 2005. 150p).
- Vargas, X., Afanasjeva, N., Alvarez, M., Marchal, P., & Choplin, L. (2008). Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto inducida bajo termo-oxidación in situ en un reoreactor. *Dyna*, 155, 191-198.