

## Ligantes asfálticos venezolanos modificados con polvo de neumáticos fuera de uso

Autores:

**Pablo Joskowicz<sup>1</sup>, Carlos Villegas<sup>1</sup>, Lourdes Arias<sup>1</sup>, José Escobar<sup>1</sup>, Franklin Landa<sup>1</sup>, Gustavo Corredor<sup>2</sup> y Johannes Noriega<sup>3</sup>**

(1) PDVSA INTEVEP, Grupo de Asfaltos, Gerencia Técnica de Calidad de Productos  
joskowiczp@pdvsa.com, villegasc@pdvsa.com, ariassl@pdvsa.com  
Urbanización Santa Rosa, sector El Tambor, Los Teques, Estado Miranda, Venezuela  
Teléfono: +58-212-330.7549

(2) Universidades Santa María y Católica Andrés Bello, Profesor de Pavimentos,  
Universidad Central de Venezuela, Profesor de Evaluación de Pavimentos.  
gcorredorm@cantv.net

Quinta Mi Madrina, Calle Perú, Club Hípico, Caracas  
Teléfono: +58-414-324.0785

(3) Ministerio de Obras Públicas y Vivienda (MOPVI). Dirección General de Vialidad  
johannesnoriega@hotmail.com  
Av. Francisco de Miranda, Chacao, Caracas  
Teléfono: +58-212-201.3533

### Resumen

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de ligantes asfálticos venezolanos modificados (vía húmeda) con polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU) de vehículos de carga pesada. La combinación de asfaltos venezolanos de grados de penetración 60/70 y 85/100 y asfalto para impermeabilización tipo Roofer Flux, con 15% p/p de polvo de caucho dio como resultado ligantes modificados con buenas propiedades físico-químicas y reológicas, los cuales pueden considerarse como potenciales formulaciones para su escalamiento y aplicación en campo.

Para los ligantes asfálticos 60/70 y 85/100 (modificados con polvo de NFU) fue posible obtener mezclas asfálticas que cumplieron con las propiedades Marshall, utilizando una temperatura de mezclado de 170 °C y temperaturas de compactación entre 150 y 170 °C. Para dichos asfaltos, los valores de Estabilidad y Flujo no variaron significativamente con la temperatura de compactación. Para la mezcla asfáltica generada a partir del ligante asfáltico Roofer Flux el porcentaje de vacíos estuvo por encima de los porcentajes de vacíos totales exigidos para el diseño de mezcla de laboratorio (3%-5%), lo que no garantiza buen desempeño bajo condiciones de alta carga. Finalmente, se puede afirmar que las mezclas con ligantes asfálticos 60/70 y 85/100 modificados con polvo de NFU tienen alto potencial para ser utilizadas en mezclas asfálticas de alto desempeño tipo M12 para pavimentación.

## Introducción

Los neumáticos son materiales constituidos por múltiples componentes entre los que se encuentran: negro de carbono, óxido de zinc, acero, material textil, azufre, elastómeros y en mayor proporción caucho natural o sintético. Tales componentes le confieren al neumático propiedades de resistencia en condiciones extremas, lo que los convierte en materiales prácticamente indestructibles, dificultando su disposición y, aunque después de su uso no son residuos peligrosos, son considerados un importante problema ambiental.

Una forma de aprovechar los neumáticos desechados que ha venido tomando importancia es la incorporación de polvo de caucho a los asfaltos para su aplicación en las áreas de pavimentación e impermeabilización. Esta alternativa permite mejorar las propiedades reológicas de los ligantes, incrementando su intervalo de plasticidad y contribuyendo con la disposición favorable del pasivo ambiental que representan los neumáticos fuera de uso.

La incorporación de caucho molido (en polvo) al material asfáltico se puede realizar por dos métodos. El primero de ellos corresponde al proceso de adición por vía seca, cuyo fundamento reside en el uso de un máximo de 2% en peso de partículas de caucho (con tamaño de partícula entre 2 y 4 mm) como parte de los agregados de las Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA). El segundo método es el proceso de adición por vía húmeda y consiste en la mezcla de entre 5 y 25% p/p de polvo de caucho (con tamaño de partícula inferior a 1 mm) con ligante asfáltico, a temperaturas entre 175 °C y 220 °C, antes de incorporar los agregados. Aunque la vía de incorporación en seco puede incrementar la resistencia a deformaciones permanentes del pavimento a temperaturas intermedias, este método no permite mejorar la resistencia al fisuramiento térmico a bajas temperaturas y podría generar problemas durante la compactación de la mezcla. Por el contrario, el método de mezclado por vía húmeda permite obtener ligantes con resistencia a deformaciones permanentes y a fisuramiento térmico.

En Venezuela, anualmente se disponen en vertederos alrededor de 107.000 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU), lo que representa aproximadamente 4.000.000 de cauchos; por tal motivo, PDVSA INTEVEP ha decidido impulsar proyectos para la recuperación de NFU, ofreciendo alternativas al país para el aprovechamiento de los neumáticos fuera de uso en aplicaciones durables y ambientalmente seguras. Por ejemplo, una opción inmediata y factible es la incorporación de polvo de caucho al asfalto, permitiendo a PDVSA ofrecer productos asfálticos diferenciados, con desempeño superior "premium", los cuales aportan como beneficio el incremento del tiempo de vida útil de los pavimentos, con los consiguientes ahorros a futuro.

En relación con lo antes mencionado, el Grupo de Asfaltos de PDVSA INTEVEP, ha venido desarrollando un proyecto orientado al desarrollo de ligantes asfálticos venezolanos modificados con polvo de NFU, mediante el método de modificación por vía húmeda, el cual inicialmente se ha llevado a cabo con asfaltos de penetración 60/70, 85/100 y asfalto para impermeabilización tipo RooferFlux con polvo de NFU de vehículos de transporte pesado (camiones). Es importante destacar que los diseños de mezclas bajo la metodología Marshall, así como la interpretación de sus respectivos resultados, ha sido posible gracias al trabajo conjunto que ha realizado el Instituto Venezolano del Asfalto (INVEAS) en colaboración con PDVSA INTEVEP.

## Objetivos

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar formulaciones de ligantes asfálticos venezolanos modificados con polvo de NFU por vía húmeda, a fin de contar en Venezuela con productos asfálticos diferenciados de mayor durabilidad y, paralelamente, contribuir con la reducción de un pasivo ambiental como son los neumáticos usados. Para alcanzar tal objetivo, se propusieron las siguientes actividades:

- Revisión documental (artículos, patentes) sobre los métodos y condiciones de modificación de asfaltos con polvo de NFU.
- Desarrollo de una metodología a nivel de laboratorio para la modificación de los ligantes asfálticos con polvo de NFU.
- Modificación de los ligantes asfálticos bajo las condiciones de agitación, tiempo y temperatura establecidos a nivel de laboratorio.
- Caracterización físico-química y reológica de los ligantes modificados.
- Realización de diseños de mezclas asfálticas INVEAS M-12, aplicando RAMCODES® y mediante la metodología Marshall con los ligantes asfálticos modificados, para validar las temperaturas de mezclado y compactación estimadas en laboratorio y determinar la factibilidad de aplicación de dichos ligantes en mezclas asfálticas en caliente.

## Desarrollo Experimental

### *Metodología para los ligantes asfálticos modificados*

Las propiedades fisicoquímicas y reológicas de las mezclas asfalto-caucho dependen de muchas variables, por lo que el proceso de obtención de un asfalto modificado con caucho tiende a ser complejo. Es por ello que la metodología experimental contempló la definición y delimitación de algunos parámetros involucrados en la obtención de estos ligantes. Por ejemplo, se fijó la granulometría del polvo de caucho y el tipo de caucho (transporte pesado), la temperatura de reacción (170 °C), el tipo de asfalto (grado de penetración 60/70, 85/100 y RoofFlux), el contenido de caucho (entre 10 y 20% p/p), la velocidad de agitación a alto corte y un sistema auxiliar de agitación a baja velocidad para garantizar la homogeneidad de la mezcla.

Se estableció como parámetro primordial de control la estabilidad de los ligantes al almacenamiento a altas temperaturas, considerándose como mezclas estables aquellas que poseen una diferencia de punto de ablandamiento entre tope y fondo (después del tratamiento térmico) no mayor de 2 °C. Adicionalmente, de las mezclas que resultaron estables, se establecieron como potenciales formulaciones aquellas que presentaron las viscosidades rotacionales (Brookfield) más bajas y valores de recuperación elástica mayores de 50%.

El sistema de mezclas empleado en el laboratorio para la preparación de los ligantes modificados con polvo de NFU comprendió principalmente de: un recipiente de 1 galón de capacidad, una manta de calentamiento con control digital de temperatura, un agitador de alto corte y otro agitador tipo propela de bajo corte. Un esquema ilustrativo del sistema completo se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Equipo utilizado para la preparación de las mezclas Asfalto-Caucho

En relación con los métodos de caracterización empleados para la evaluación de las mezclas de asfalto con polvo de NFU, los mismos están indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de caracterización empleados en la evaluación físico-química y reológica de las mezclas asfalto-caucho

Propiedad	Método ASTM
Penetración a 25 °C	D5
Punto de ablandamiento	D36
Grado PG de alta (temperatura límite)	D7175
Recuperación elástica (ductilómetro)	D6084
Punto de inflamación COC <sup>(1)</sup>	D92
Estabilidad al almacenamiento	D7173
Viscosidad Brookfield	D4402
Variación de masa después de RTFOT <sup>(2)</sup>	D2872
Penetración después de RTFOT	D5
Variación de punto de ablandamiento después de RTFOT	D36

<sup>(1)</sup> COC=Copa abierta Cleveland

<sup>(2)</sup> Ensayo de película delgada en horno rotatorio

### Metodología para las mezclas asfálticas en caliente

En esta metodología se empleó un enfoque cuantitativo que incluyó una serie de ensayos de laboratorio, como lo son: peso específico, densidad máxima teórica (RICE) y Marshall, en los cuales se manejaron cuidadosamente las variables conformadas por los agregados, ligante asfáltico y temperatura de compactación, a fin de medir su efecto sobre la variable estabilidad y flujo (Marshall).

Se efectuaron pruebas con el fin de analizar los efectos que se pudieran manifestar en la estabilidad y resistencia al flujo de las mezclas asfálticas INVEAS M-12 modificadas con polvo de NFU granulometría media, debido a la variación de las temperaturas de compactación.

Se realizaron pesadas de 1,2 kg para elaborar cada uno de los especímenes, con la finalidad de obtener un resultado uniforme en cuanto a la elaboración de los ensayos (ver Tabla 2). Una vez realizadas las pesadas se distribuyeron para cada tipo de asfalto y para tres (3) temperaturas de compactación.

Tabla 2. Distribución granulométrica de los agregados para una proporción de briqueta

Tamiz		Proporción para un espécimen de 1200 g	
ASTM	mm	Retenido	Peso (g)
3/4"	19,1	0 %	0
1/2"	12,5	10 %	120
3/8"	9,5	14 %	168
#4	4,75	32 %	384
#8	2,36	16 %	192
#50	0,30	23 %	276
#200	0,075	3 %	36
Pasante #200	0	2 %	24
Peso espécimen:	----	-----	1200

Una vez obtenidos los valores del ensayo de máxima densidad teórica, el peso específico del agua, las especificaciones de vacíos según el diseño que se va a realizar, el peso específico efectivo y el peso específico "bulk", se procedió a calcular el contenido óptimo de asfalto mediante ejecución del programa y utilización del polígono de vacíos de RAMCODES® (Tabla 3).

Habiéndose calculado el % óptimo de cemento asfáltico según el método RAMCODES®, se procedió a la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, para la posterior elaboración de las probetas Marshall.

Tabla 3. Porcentaje de asfalto óptimo y valores obtenidos por RAMCODES®

Tipo de asfalto	AMC RF-01 <sup>(1)</sup>	AMC 85-01 <sup>(3)</sup>	AMC 60-01 <sup>(2)</sup>
% C.A.	6,10	6,11	5,97
Gmb	2,383	2,384	2,380
Vv	4,31	4,28	4,31
VAM	14,07	14,04	14,069
VLL	69,37	69,50	69,38

<sup>(1)</sup> Asfalto Roofer Flux modificado con polvo de NFU

<sup>(2)</sup> Asfalto 60/70 modificado con polvo de NFU

<sup>(3)</sup> Asfalto 85/100 modificado con polvo de NFU

% C.A. = Porcentaje de Cemento Asfáltico

Gmb = Gravedad específica de mezcla asfáltica compactada

Vv = Vacíos totales

VAM = Vacíos de Agregado Mineral

VLL = Vacíos llenos de asfalto

La elaboración de las probetas con asfalto modificado se realizó colocando la mezcla asfáltica dentro de un molde metálico a una temperatura de 170 °C, dejando enfriar a tres diferentes temperaturas para cada par de muestras, a saber: 170 °C, 160 °C y 150 °C, para realizar la compactación (se procuró realizar la compactación lo más rápido posible para evitar el descenso en la temperatura de la mezcla). Los agregados se calentaron 10 °C por encima de la temperatura de mezclado para compensar cualquier enfriamiento producto del manejo de los mismos, para luego incorporarles el cemento asfáltico. Las mezclas asfálticas se compactaron golpeándolas 75 veces cada cara y se esperó a que las probetas disminuyeran su temperatura para extraerlas de los moldes.

El ensayo de Estabilidad y Flujo se llevó a cabo sumergiendo primeramente las probetas en un baño de María a 60 °C, por 30 minutos; las cuales fueron posteriormente colocadas en las mordazas de la prensa de ensayo. La carga registrada antes del fallo de la muestra (carga máxima) se tomó como “Estabilidad” de la mezcla. A través del medidor de fluencia se registró la deformación sufrida por el cuerpo de prueba mientras se le aplicó la carga hasta su valor máximo “Flujo”. Los valores obtenidos se compararon con los establecidos como requisito en el apartado 12-10-14 de la norma INVEAS y cuyos valores se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Propiedades Marshall según norma INVEAS (versión revisada Diciembre 2004)

PROPIEDAD	TIPO DE TRÁNSITO		
	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>
Estabilidad Marshall, mínimo (lbs.)	2200	1800	1600
Flujo (pulg./100)	8 - 14	8 - 14	8 - 16

## Resultados

Durante el trabajo de investigación se prepararon mezclas con distintos contenidos de polvo de NFU, desde 10 hasta 20%; sin embargo, las formulaciones que resultaron con mejor balance de propiedades fueron las que se presentan en la Tabla 5, cada una de las cuales posee un 15% de polvo de NFU.

Tabla 5. Características de las mejores formulaciones obtenidas de ligantes asfálticos modificados con polvo de NFU.

Propiedades	AMC RF-01	AMC 85-01	AMC 60-01
Temperatura PG alta (°C)	76	82	82
Penetración (dmm)	83	56	41
Punto de Ablandamiento R&B (°C)	50,7	57,9	62,1
Punto de Inflamación COC (°C)	315	280	293
Viscosidad @ 135°C (cP) (s21)	3637	4331	5109
Viscosidad @ 150°C (cP) (s34)	1760	2517	2592
Viscosidad @ 170°C (cP) (s34)	1120	1419	1493
Pérdida Masa (%) RTFOT 25 g	-0,187	-0,096	-0,463
Penetración después de RTFOT (25 g) (dmm)	59	39	31
Pto. Ablandamiento después RTFOT (25 g) (°C)	65,9	72,1	66,1
Diferencia de Pto. Ablandamiento (°C)	15,2	14,2	4
% P. Original (%)	71	70	73

Tal como se aprecia, las temperaturas PG de alta para el ligante AMC 85-01 y AMC 60-01 son típicas de asfaltos modificados. Por otra parte, se aprecia que las viscosidades obtenidas para los tres ligantes son elevadas (> 3000 cP), al punto que se requirió determinar las mismas a 170

°C con propósito de obtener valores inferiores a los 3000 cP. Los demás parámetros mostrados en la Tabla 5 no evidenciaron valores excepcionales.

Con el propósito de efectuar la evaluación de los ligantes asfálticos modificados con polvo de NFU en mezclas asfálticas en caliente (HMA) mediante la metodología Marshall, fue necesario realizar varias reacciones (de 2 kg cada una) tal que se obtuviese material suficiente para llevar a cabo la referida evaluación. Estas reacciones sirvieron también para validar la metodología de preparación de los asfaltos modificados con polvo de NFU a escala laboratorio (Figura 1). La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos para las réplicas de las reacciones de modificación. Los valores de penetración obtenidos para cada formulación presentaron una variación máxima de 9% entre 5 reacciones, lo cual es indicativo de una buena reproducibilidad entre las mismas; comprobándose que el método de preparación empleado en el laboratorio da lugar a mezclas con baja variabilidad en la calidad del producto final, dado que la penetración es una propiedad muy sensible a pequeñas variaciones en la calidad de las mezclas.

Tabla 6. Réplicas de las reacciones de ligantes asfálticos modificados con polvo de NFU, denominados AMC RF-01, AMC 60-01 y AMC 85-01 y sus valores de penetración.

Mezcla AMC RF-01	Penetración @ 25°C (dmm)
Réplica 1	89
Réplica 2	90
Réplica 3	88
Réplica 4	81
Réplica 5	84
<b>Mezcla de las réplicas</b>	<b>83</b>

Mezcla AMC 85-01	Penetración @ 25°C (dmm)
Réplica 1	61
Réplica 2	57
Réplica 3	60
Réplica 4	55
Réplica 5	59
<b>Mezcla de las réplicas</b>	<b>56</b>

Mezcla AMC 60-01	Penetración @ 25°C (dmm)
Réplica 1	40
Réplica 2	41
Réplica 3	42
Réplica 4	41
Réplica 5	43
<b>Mezcla de las réplicas</b>	<b>41</b>

A continuación, en la Tabla 7 se presentan las propiedades de las mezclas AMC RF-01, AMC 85-01 y AMC 60-01 en comparación con ligantes asfálticos vírgenes comerciales (para pavimentación) con valores de penetración similares, a saber: 85/100, 60/70 y 40/50,

respectivamente. Por otra parte, éstos últimos también se utilizaron para los diseños de mezcla Marshall-RAMCODES<sup>®</sup> con propósitos comparativos.

Como se puede observar, las mezclas asfalto-polvo de NFU presentan grados de desempeño PG (alta) superiores a los de asfaltos vírgenes comerciales de similar valor de penetración, lo cual debería verse reflejado en una mayor capacidad para soportar cargas debidas al tránsito de vehículos a temperaturas más elevadas (menor susceptibilidad a deformaciones permanentes por carga). Así mismo, la recuperación elástica de las mezclas asfalto-polvo de NFU presenta valores marcadamente superiores a los correspondientes a las de los asfaltos vírgenes, lo que incrementa directamente su capacidad para recuperar las deformaciones y mitigar o al menos retardar la aparición de grietas debidas a cargas cíclicas (fatiga).

Tabla 7. Propiedades de los ligantes asfálticos utilizados para la realización de los diseños de mezclas asfálticas en caliente (Marshall-RAMCODES<sup>®</sup>). Ligantes modificados con polvo de NFU (AMC-RF-01, AMC-85-01 y AMC-60-01); ligantes vírgenes (85/100, 60/70 y 40/50)

Propiedades	AMC RF-01	AMC 85-01	AMC 60-01	85/100	60/70	40/50
Gravedad específica	0,9596	1,0172	1,0204	1,0108	1,0189	1,0333
Temperatura PG alta (°C)	76	82	82	64	64	70
Penetración (dmm)	83	56	41	96	66	42
Punto de Ablandamiento (°C)	50,7	57,9	62,1	44	48,3	54,3
Recuperación Elástica (%)	46	60	70	15	18	27
Punto de Inflamación (°C)	315	280	293	287	288	293
Visc. @ 135°C (cP) (s21)	3637	4331	5109	368	482	980
Temp. Mezclado (°C) TTS <sup>1</sup>	167	167	171	154	155	157
Temp. Compactación (°C) TTS <sup>1</sup>	152	153	156	142	142	144
Pérdida de Masa (%) RTFOT	-0,187	-0,096	-0,463	0,041	-0,534	-0,496
Estabilidad @ 163°C, 48 h, diferencia tope y fondo (°C)	1	0,1	1,2	NA	NA	NA

<sup>1</sup> Método AASHTO (Método Casola o del Ángulo de Fase)

NA = No aplica

Por otra parte, se puede observar que si bien los valores de la viscosidad (@ 135°C) de las mezclas asfalto-polvo de NFU prácticamente son un orden de magnitud mayores que las de sus asfaltos vírgenes análogos (en valor de penetración), esto no incrementa de forma tan marcada las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio de las primeras respecto de estas últimas; estando el aumento en el orden de los 15 a 17 °C, aproximadamente. Si bien las

temperaturas de mezclado y compactación son mayores, éstas pueden ser manejadas sin mayores inconvenientes en laboratorio y campo.

Un aspecto muy importante a resaltar es que las mezclas mostradas en la Tabla 7 resultaron ser estables al almacenamiento a altas temperaturas, por 48 h. Esto indica que las reacciones asfalto-polvo de NFU fueron efectivas y de cierta forma garantiza que no habrá segregación de los componentes durante el mezclado con los agregados, el almacenamiento de la mezcla asfáltica y la pavimentación; resultando en pavimentos con características homogéneas en lo que al ligante asfáltico se refiere.

Posterior a la evaluación de los ligantes asfálticos modificados y tal como se mencionó en la parte experimental, se procedió a realizar en colaboración con el INVEAS los diseños de mezclas asfálticas mediante las metodologías RAMCODES® y Marshall. Según los resultados obtenidos en laboratorio mediante el método de Ángulo de Fase (método Casola) de temperatura de mezclado y compactación adecuados para la realización de las briquetas, se decidió unificar la temperatura de mezclado para todas las mezclas en 170 °C y se quiso conocer cómo afectaba las propiedades Marshall el compactar dichas mezclas a diferentes temperaturas, por lo que se compactaron a 150, 160 y 170°C. La Figura 1 muestra unas de las briquetas elaboradas con los ligantes asfálticos modificados con polvo de NFU.

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos Marshall para las mezclas asfálticas preparadas con los ligantes vírgenes comerciales y los modificados con polvo de NFU.

Tabla 8. Estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas en caliente obtenidas a partir de ligantes asfálticos comerciales y los modificados con polvo de NFU.

Cemento Asfáltico	% C.A.	Temperatura de Mezclado (°C)	Temperatura Compactación (°C)	Densidad briqueta (Ton/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (lbs.)	Flujo (pulg./100)
<b>85/100</b>	5,95	155	130	2,39	2268	15,5
			140	2,39	2104	14,0
			150	2,39	2689	10,5
<b>60/70</b>	6,01	155	130	2,38	2151	15,5
			140	2,39	2181	16,0
			150	2,40	2478	11,0
<b>40/50</b>	5,90	155	130	2,35	1865	15,0
			140	2,40	2622	17,0
			150	2,36	2290	11,5
<b>AMC RF-01</b>	6,10	170	150	2,36	2066	12,5
			160	2,36	2058	13,5
			170	2,36	2011	14,0
<b>AMC 85-01</b>	6,11	170	150	2,36	2432	11,0
			160	2,38	2665	12,0
			170	2,36	2455	13,0
<b>AMC 60-01</b>	5,97	170	150	2,37	2572	13,5
			160	2,38	2549	13,0
			170	2,38	2642	13,5

Como puede observarse la densidad de las mezclas asfálticas se ve muy poco afectada por la presencia del polvo de NFU en el ligante, lo que indica que la compactación es viable a las temperaturas seleccionadas.

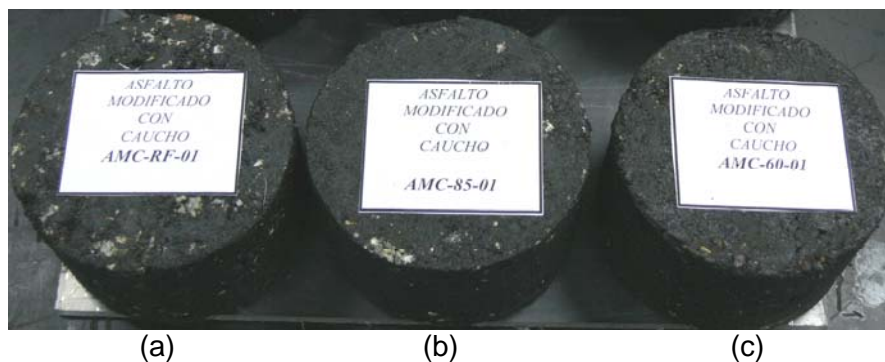


Figura 1. Briquetas Marshall de las mezclas asfálticas preparadas utilizando los ligantes asfálticos modificados con polvo de NFU. (a) AMC RF-01, (b) AMC 85-01 y (c) AMC 60-01.

Por otra parte, al comparar los valores de Estabilidad y Flujo de las mezclas asfálticas con polvo de NFU, con los requeridos por el INVEAS para el tipo de tránsito **alto**, se encuentra que las obtenidas a partir de los ligantes AMC 85-01 y AMC 60-01 cumplen con lo requerido; mientras que la mezcla obtenida con el ligante AMC RF-01 satisface los requerimientos para tránsito **medio**. Estos resultados son válidos para mezclas preparadas en laboratorio a 170 °C, y compactadas a 150, 160 y/o 170 °C .

## Conclusiones

Se comprobó mediante réplicas de las reacciones (para la obtención de AMC-RF-01, AMC-85-01 y AMC 60-01), que la metodología de mezclado empleada permite reproducir la calidad del producto final con una variación máxima del 9%.

Basado en la variación de contenido de caucho de las mezclas analizadas, se concluye que al usar porcentajes por encima de 15%, las mezclas presentan altas viscosidades dificultando su manipulación, y por debajo de 15% presentan inestabilidad al almacenamiento, debido principalmente a su relativamente baja viscosidad.

El contenido de ligante asfáltico óptimo para las mezclas, según la metodología RAMCODES<sup>®</sup>, fue apenas ligeramente mayor (0,07 a 0,15 %) para los ligantes modificados con polvo de NFU que para los ligantes vírgenes de penetración homóloga.

A pesar de que la viscosidad de los ligantes modificados con polvo de NFU a 135°C resultó mayor a 3000 cP, es factible su manipulación y mezclado (desde el punto de vista práctico), requiriéndose sólo mayores temperaturas que para los ligantes asfálticos convencionales (aproximadamente 20 °C por encima que la de estos últimos).

Para los ligantes asfálticos AMC 85-01 y AMC 60-01 (modificados con polvo de NFU) fue posible obtener mezclas asfálticas que cumplieron con las propiedades Marshall, utilizando una temperatura de mezclado de 170 °C y temperaturas de compactación de 150, 160 y 170 °C. Para dichos asfaltos, los valores de Estabilidad y Flujo no variaron significativamente con la temperatura de compactación.

Finalmente, se puede afirmar que las mezclas AMC-85-01 y AMC-60-01 tienen alto potencial para ser utilizadas en mezclas asfálticas de alto desempeño (con gradación granulométrica M12) para pavimentación.

## Referencias

1. Billiter, T.; Davison, R.; Glover, C.; Bullin, J.. Physical Properties of asphalt-rubber binder. *Petroleum Science and Technology*. 1997; 5 (3, 4 Suppl): 205-236.
2. Billiter, T.; Davison, R.; Glover, C.; Bullin, J.. Investigation of the curing variables of asphalt-rubber binder. *Petroleum Science and Technology*. 1997; 5 (5, 6 Suppl): 445-469.
3. Dantas, Silvrano; Farias, Márcio; Pais, Jorge; Pereira, Paulo; Sousa, Jorge. Influence of characteristics of crumb rubber and digestion time on the properties of asphalt rubber binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2005; 10 (10 Suppl).
4. Escobar, José. Estado del Arte Asfalto Modificado [Estado del Arte]. Los Teques, Venezuela: Intevep, 2008. Documento Técnico N°: SEA-0036, 2008.
5. Gawel, Irena; Stepkowski, Robert; Czechowski, Franciszek. Molecular interactions between Rubber and Asphalt. *Ind Eng Chem Res*. 2006; 45: 3.044-3.049.
6. Leite, L.; Soares, B. Interactions of asphalt with ground tire rubber. *Petroleum Science and Technology*. 1999; 17 (9, 10 Suppl): 1.071-1.088.
7. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. España, Centro de estudios y experimentación de obras publicas CEDEX, Mayo 2007.
8. Monteiro, José; Zveibil, Victor. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos [Manual]. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2001.
9. Navarro, F.; Partal, P.; Martínez-Boza, M.; Gallegos, C. Influence of crumb rubber concentration on the Rheological behaviour of a crumb rubber modified bitumen. *Energy & Fuel*. 2005 June; 19: 1.984-1.990.
10. Navarro, F.; Partal, P.; Martínez-Boza, M.; Gallegos, C. Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens. *Chem Eng J*. 2002 Feb; 89: 53-61.
11. Navarro, F.; Partal, P.; Martínez-Boza, M.; Gallegos, C. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel*. 2004 May; 83: 2.041-2.049.
12. Silva, Madelen; Teixeira, Luisa; Zapata, Yusneidy. Estudio de mercado y revisión de la situación actual de neumáticos en Venezuela [Informe Técnico]. Los Teques, Venezuela: Intevep, 2008. Documento Técnico N°: INT-12381, 2008.
13. Joskowicz, Pablo; Villegas, Carlos; Arias, Lourdes; Noriega, Johannes. Modificación de asfaltos con polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso. Parte II. [Nota Técnica]. Los Teques, Venezuela: Intevep, 2010. Documento Técnico N°: NTE-0664, 2010.