

0022 - ASFALTOS MEJORADOS Y MODIFICADOS CON POLVO DE NFU Y SU IMPACTO EN EL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Gerardo BOTASSO¹, Enrique FENSEL², Oscar REBOLLO³

¹ LEMaC, Centro de Investigaciones Viales UTN-FRLP-CIC-PBA, Calle 60 y 124, La Plata, gerardobot@hotmail.com.ar

² LEMaC, Centro de Investigaciones Viales UTN-FRLP-CIC-PBA, Calle 60 y 124, La Plata, efensel@frlp.utn.edu.ar

³ LEMaC, Centro de Investigaciones Viales UTN-FRLP-CIC-PBA, Calle 60 y 124, La Plata, orrebollo@hotmail.com.

Resumen

La incorporación de polvo de neumáticos fuera de uso, NFU, por vía húmeda en cementos asfálticos, es una técnica que hace más de 20 años ha sido considerada como una alternativa válida a la hora de considerar la eliminación de un residuo de valor tecnológico, como así también producir mejoras de significación en las mezclas asfálticas donde este tipo de asfalto se puede utilizar. Se realiza un análisis reológico de asfaltos con inclusión del polvo de NFU considerando morfología de las dispersiones por microscopía óptica, valores de desempeño por medio de la determinación del valor PG de cada formulación y las variaciones en el Creep Compliance de acuerdo a la técnica del MSCR. A fin de valorar posibles tasas de incorporación se analizan el asfalto convencional, el asfalto con adición de polvo de NFU, un asfalto modificado con SBS y otro con una combinación de polvo de NFU y SBS. Luego se diseña una mezcla asfáltica densa, donde se pueden observar los desempeños frente al diseño Marshall, relaciones volumétricas, adherencia, ahuellamiento, punzonado y tracción indirecta.

Palabras Clave: RECICLADO, NFU, MODIFICACION, REOLOGIA

1 Introducción

El empleo de caucho procedente de neumáticos usados para modificar las propiedades de los asfaltos data de los años 50, aunque no fue hasta 1963 la primera vez que se realizó una prueba industrial de cierta relevancia.

En la mayoría de los casos se ha optado por la dispersión del polvo de caucho en el ligante asfáltico considerandos dos vías principales [1]:

- ✓ Modificación por “Vía Húmeda”: este procedimiento consiste en la dispersión del polvo de NFU dentro del asfalto. El asfalto con caucho se emplea posteriormente en la fabricación de las mezclas asfálticas.
- ✓ Modificación por “Vía Seca”: en este caso, el caucho molido se trata como un “árido”, mezclándose con el asfalto y el resto de áridos para obtener una mezcla asfáltica de características especiales.

Puede darse el caso además de lo que en algunos países se ha denominado “sistema híbrido” consistente en una combinación de las estrategias de modificación señaladas con anterioridad.

Por vía húmeda se pueden considerar dos posturas diferenciadas:

- ✓ Instalaciones sin almacenaje: concebidas para fabricar asfalto-caucho en el mismo lugar donde se encuentra la planta elaboradora de la mezcla con los agregados, de forma tal que no existe en la práctica un almacenaje y transporte del producto en cisternas.
- ✓ Modificación de asfaltos con caucho en instalaciones similares a la de producción de asfaltos tratados con polímeros vírgenes. El producto es almacenado, controlado, transportado en cisternas; presenta similares características que el asfalto modificado con polímeros. La instalación no se encuentra en la planta de producción de la mezcla asfáltica.

Entonces, pueden existir diferentes tipologías de asfaltos modificados, como las que se señalen a continuación [2] y [3]:

- ✓ Pueden existir asfaltos que se modifiquen en el sitio con cualquier tipo de polímero, incluido el polvo de NFU.
- ✓ Pueden existir también asfaltos modificados a los cuales se le agregue polvo de NFU y cumplir con los estándares de un AM-2 o AM-3 (según Norma IRAM 6596), y que se realicen tanto en instalaciones industriales como “in situ”.

Las características físicas resultantes de la dispersión asfalto-polímero dependen del tipo de asfalto, de la cantidad y tipo de polímero, de la compatibilidad entre los constituyentes, del proceso de mezclado y de las historias térmicas de los materiales. Los asfaltos para ser modificados con polímeros deben ser bajos en contenido de asfaltenos y deben de poseer suficientes aceites aromáticos para microdispersar el polímero a las temperaturas de mezclado, lo que habitualmente expresa una estructura del tipo SOL del sistema [4].

El polímero debe tener cierto grado de compatibilidad con el asfalto de tal forma que ocurra una completa humectación del primero con las fracciones saturadas del segundo; esta compatibilidad parcial se logra mediante la humectación del polímero por los aceites malténicos del asfalto.

Para extender el rango de aplicaciones del asfalto, resulta necesario conocer la manera en que está interactuando con el polímero. Una de las formas de conocer el grado de compatibilidad entre los dos materiales es visualizando la microestructura del compuesto [5].

El gran crecimiento en el empleo de los asfaltos modificados con polímeros se ha dado en paralelo con las experiencias de betunes modificados con polvo de neumáticos; sin embargo, los primeros llegaron a consolidarse como el máximo estándar de calidad, mientras que los segundos han sufrido una serie de vaivenes en su desarrollo, sin llegar, en muchos países, a consolidarse, ni a legislarse claramente sobre los mismos.

En el presente trabajo se incorpora el NFU por vía húmeda, como único agente modificador, como así también en combinación con polímeros vírgenes.

Resulta central realizar un control de la viscosidad final del producto, ya que este puede ser excesivamente elevado a la hora de ser trasvasado y bombeado para la producción de la mezcla asfáltica.

Entre otras, esta ha sido una de las razones en considerar el aporte de polvo de caucho, junto al polímero virgen.

La recomendación de las principales normativas vigentes aconseja que la temperatura máxima de colocación no sobrepase los 180 °C. Si por criterios de espesor de película de asfalto en el árido o por condiciones de compactación, o en

todo caso por razones de bombeabilidad del mismo se debiera superar la misma, en general se aconseja reformular la dispersión polimérica.

El “manual del empleo del caucho en mezclas bituminosas” elaborado por el CEDEX de mayo de 2007, especifica tres tipos de betunes asfálticos modificados con caucho cuando se realiza la incorporación por vía húmeda:

- a. BC Betún mejorado con caucho (8 al 12 % de polvo de NFU)
- b. BMC Betún modificado con caucho (12 al 15 % de polvo de NFU)
- c. BMAVC Betún modificado de alta viscosidad con caucho (15 al 22 % de polvo de NFU).

En Argentina, la norma IRAM 6673, genera una clasificación solamente comparable con la de los asfaltos mejorados (Punto a.), dividiéndolos en dos grupos: AC1 y AC2.

Un proceso de significación a considerar es la digestión del caucho de NFU en los asfaltos. Se denomina digestión o maduración del polvo de caucho en el asfalto el proceso por el cual el polvo de NFU se reblandece al incorporarse al mismo a una temperatura elevada. Las partículas se reblandecen, absorben en un cierto grado las fracciones livianas del asfalto (tales como resinas y aceites) y se hinchan disminuyendo la distancia entre partículas y asfalto volviendo el ligante más viscoso. Precisamente, el aumento de volumen del polvo de neumático fuera de uso en el asfalto es lo que evidencia el proceso de digestión. Este proceso se puede medir por medio de la viscosidad, considerando que se está trabajando con un material compuesto cuyo flujo será no newtoniano, por lo que el valor medido puede ser solo una referencia. Es conveniente valorar esta propiedad porque se puede estimar la acción del polvo de NFU y cualquier otro polímero en el asfalto. Resulta interesante en los ensayos realizados con el viscosímetro rotacional, tanto en el caso de los asfaltos modificados con NFU como con dispersiones poliméricas, repetir las mediciones de la viscosidad para una misma aguja, un mismo torque para cada temperatura y por ejemplo, realizar unas cuatro determinaciones de viscosidad, conforme se avanza en las determinaciones; si se observa que las mismas van disminuyendo, dentro del entorno de temperatura seleccionado, hace inferir que el polímero puede estar sobrenadando en la cápsula que contiene al asfalto, poniendo de manifiesto que la dispersión no es estable. La digestión del caucho en el asfalto resulta un factor central a ser considerado en los procesos de modificación por vía seca [6], [7].

2 Caracterización de las dispersiones poliméricas en el asfalto

Se proponen, para una adecuada valoración de las dispersiones considerar los siguientes ensayos:

- ✓ Cromatografía SARA
- ✓ Clasificación de acuerdo a marco normativo
- ✓ Morfología de los asfaltos modificados
- ✓ Comportamiento reológico

2.1 Cromatografía SARA

Se utiliza la técnica de absorción: ASTM D-4124 basada en el método de Corbett y Swarbrick, debido a que la misma se encuentra normalizada y por accesibilidad al equipamiento. El método consiste en la precipitación de los asfaltenos mediante n-

heptano. La fracción soluble fluye a través de la columna cromatográfica, rellena en una alúmina de características especiales, con el fin de separar mediante solventes de polaridad creciente las diferentes fracciones que componen a la fase malténica de la siguiente forma: - Parafinas o saturados: la fracción que primero fluye de la columna cromatográfica con n-heptano; es incolora. - Nafténicos aromáticos: esta fracción fluye a través de la percolación con un solvente de mayor polaridad como el tolueno; es de color amarillo al ámbar. - Polar aromáticos: esta fracción eluye a través de la columna mediante elusión con un solvente de mayor polaridad aún, el tricloroetileno; es de color oscuro casi negro y viscosa.

2.2 Morfología de los asfaltos modificados

Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptica para mejorar las propiedades reológicas del ligante. Todo efecto cuya acción sea la modificación de la composición química del asfalto conduce inevitablemente a la modificación de su estructura y propiedades.

La norma por la que se ha optado para aplicar esta técnica es la UNE EN 13632-2010: Visualización de la dispersión de polímeros en betunes modificados con polímeros [8].

Especifica un método para la visualización, mediante microscopía de fluorescencia de la distribución polimérica en un asfalto modificado. La norma sugiere que el método se aplique sólo como método de identificación en el control de producción.

Siguiendo la técnica especificada en la norma permite asignar a la imagen las siguientes calificaciones vistas en la Tabla 1:

Tabla 1. Códigos con letras de categorización de las imágenes/ UNE EN 13632-2010

Tipo de fase	letra	Descripción	Tipo de fase	letra	Descripción
Continua	P	Fase continua polimérica	Descripción del tamaño	S	Pequeño, < 10 µm
	B	Fase continua bituminosa		M	Medio, entre 10 µm y 100 µm
	X	Ambas fases son continuas (fases entrelazadas)		L	Grande >100 µm
Descripción de la fase	H	Homogénea	Descripción de la forma	C	Redondeada
	I	No homogénea		S	Laminar
				O	Otra

2.3 Comportamiento reológico

La reología se define como la ciencia que estudia la respuesta de deformación y flujo de los materiales sometidos a cargas con condiciones determinadas, en el tiempo. Se entiende que tales respuestas pueden estar relacionadas con el esfuerzo aplicado, la temperatura del material, la velocidad de aplicación de la carga y eventualmente el tiempo de carga (sistemas tixotrópicos). Los ligantes asfálticos, por su composición particular, también tienen comportamientos distintos ante esfuerzos, temperatura, velocidad de la perturbación y tiempo de aplicación de dicha perturbación. Además, los cambios inminentes en su estructura molecular ante fenómenos de oxidación, temperatura y endurecimiento por almacenamiento

isotérmico, merecen atención al momento de interpretar resultados de ensayos [9]. Indiscutiblemente, la reología en el asfalto enfrenta un escenario de respuesta en cambio constante [9].

La obtención de información de parámetros reológicos sobre el comportamiento de materiales, a partir de ensayos que manejan rangos no lineales, representa un reto complejo, ya que las variables a medir son dependientes del nivel de esfuerzo, de la deformación unitaria, del tiempo de carga y de la temperatura.

Bahia (2009) [10] menciona que las propiedades que caracterizan de mejor manera a los ligantes dentro del rango lineal son la resistencia a la deformación bajo carga y la distribución de la deformación discriminada en sus componentes elásticas y viscosas. Por otro lado, los tipos de ensayos más apropiados para determinar las propiedades reológicas son los de carga oscilatoria y carga *creep*. Los parámetros calculados a partir de ensayos oscilatorios de corte son el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), cuya magnitud está relacionada con la resistencia total a la deformación ante una carga y la distribución relativa de la deformación (elástica y viscosa), respectivamente. Estos parámetros presentan una variación importante con cambios de temperatura y tiempo de carga.

Los principales ensayos de la metodología son: Viscosidad, envejecimiento a corto y largo plazo, reómetro de corte y reómetro de flexión.

Se define como viscosidad aparente a la relación entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de cizallamiento específica de un fluido newtoniano o no-newtoniano. La viscosidad aparente se realiza empleando el viscosímetro rotacional con cámara termostatazada, de tipo Brookfield Thermosel o similar. El ensayo está normalizado según ASTM D-4402 - IRAM 6637

Se utiliza un reómetro electrodinámico de baja fricción para la determinación de las propiedades viscoelásticas a distintas frecuencias y temperaturas de materiales sólidos, semisólidos y líquidos.

Se ha seguido el protocolo de ensayo de la norma AASHTO TP 70. Los ligantes han sido envejecidos durante 85 min con el horno RTFO de acuerdo al estándar ASTM D2872, para luego en otra parte del método caracterizar el ligante luego de ser envejecido por el RTFO (simula envejecimiento mezcla asfalto-árido en planta) y el PAV ASTM D6521 envejecimiento en recipiente presurizado (simula envejecimiento a largo plazo).

3 Caracterización del asfalto base utilizado

3.1 Asfalto convencional

Se detalla a continuación la caracterización del asfalto base el cual será utilizado en las dispersiones poliméricas. De acuerdo con los ensayos descritos en la norma IRAM 6835 el asfalto clasifica como del tipo CA-20. Tabla 2.

Mediante el ensayo SARA (ASTM D4124) se obtiene la composición y la correspondiente valoración de la fracción malténica afín a los polímeros a dispersar.

Tabla 2. Composición SARA del cemento asfáltico.

Asfalto	Asfaltenos %	Saturados %	N – A Aromáticos %	P – A resinas %	Ic
Asfalto CA-20	7,30	19,6	58,3	14,8	0,37
CA-20 luego RTFO	10,0	18,6	57,8	13,6	0,40
Rangos típicos	5-25	5-20	45-60	15-25	≤ 0,60

3.2 Determinación del PG del asfalto CA-20

Primero, se corrió la prueba AASHTO T 315 en una muestra de ligante original.

Luego, con una muestra envejecida con RTFO, se ensayó con una geometría de 25 mm de diámetro, iniciando en la temperatura nominal de cumplimiento obtenida en la muestra de asfalto original (64 °C), y probándose también a una temperatura de 70 y 76 °C.

Se comprobó el cambio de masa con el ensayo en el RTFO, según el protocolo AASHTO T 240.

Finalmente, se evaluó la muestra de ligante envejecida con el PAV y previamente envejecida con RTFO, donde se comprobó el criterio de fatiga en el ensayo DSR ($G^*/\text{sen } \delta$) y el criterio para fisuras por baja temperatura en el BBR (Reómetro de viga de flexión). Resultados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores obtenidos en la determinación del PG del asfalto

Parámetro	Norma	Valor	Límite AASHTO M 320
<i>Ligante original</i>			
Punto de inflamación	AASHTO T 48	237 °C	Mínimo 230 °C
Viscosidad, 135 °C	AASHTO T 316	0,381 Pa.s	Máximo 3 Pa.s
$G^*/\text{sen } \delta$, 10 rad/s	AASHTO T 315	1,21 kPa, 64 °C	Mínimo 1 kPa
Residuo del RTFO, AASHTO T 240			
Cambio de masa	AASHTO T 240	0,753 %	Máximo 1 %
$G^*/\text{sen } \delta$, 10 rad/s	AASHTO T 315	2,55 kPa, 70 °C	Mínimo 2,2 kPa
Residuo del PAV, AASHTO R 28, 100 °C			
$G^*/\text{sen } \delta$, 10 rad/s	AASHTO T 315	2690 kPa	Máximo 5 000 kPa
Rigidez S, 60 s	AASHTO T 313	93,25 MPa, -12 °C	Máximo 300 MPa
Valor m, 60 s	AASHTO T 313	0,31, -12 °C	Mínimo 0,3

En resumen, utilizando la clasificación de norma ASTM D 6373, el ligante cumplió con los requisitos correspondientes a un asfalto de grado de desempeño **PG64 (25) - 22**.

3.3 Ensayo de MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)

Se aplica la norma AASHTO TP 70. De acuerdo con los lineamientos de ensayo, la temperatura de ensayo debe corresponder a la temperatura alta de diseño, sin aplicar saltos de grado. Por lo que se tiene que determinar una temperatura de diseño a la cual se debe realizar el ensayo. En este caso, se ha supuesto una temperatura alta de diseño de 58 °C.

Si la zona de diseño requería un valor de 58 °C por demanda de las condiciones de la zona geográfica a 7 días de máxima temperatura de 10 años de registros, (como se ha supuesto para el desarrollo del MSCR) y el cemento asfáltico CA-20 posee un PG por clima de PG 64-22, se puede decir que en esa condición térmica de diseño responde con un grado de tránsito V: **58 – 22 V**. (Figura 1).

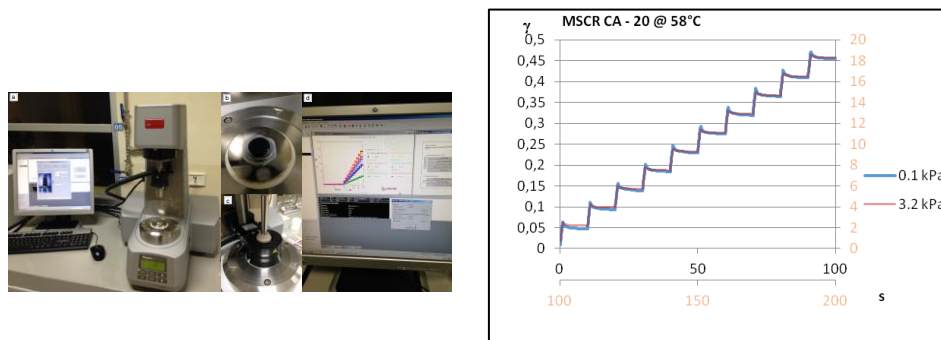


Figura 1. Ensayo de MSCR sobre el CA-20

4 La aditivación del asfalto

4.1 La microdispersión de los polímeros

La microdispersión de los polímeros se ha realizado por vía húmeda. La vía húmeda garantiza una adecuada interacción entre las fracciones de caucho y las fracciones malténicas y resinosas del asfalto, dándose el proceso de humectación e hinchamiento comprendido como digestión del sistema asfalto con los polímeros seleccionados. Se ha trabajado en un sistema de dispersión que evite dos grandes problemas que se pueden presentar en el proceso de mezclado, que no se forme vórtice y la prevención del flujo circulatorio. De esta forma la máxima velocidad otorgada al rotor con respecto al estator fue de 4000 rpm en el mezclado y una temperatura máxima de la dispersión de 180 °C. Se verificó por la técnica del SARA descrita en la norma ASTM 4124, sobre una muestra de asfalto CA-20 sin polímero, y los valores de la composición del asfalto se mantuvieron relativamente constante, permaneciendo el asfalto con una estructura tipo sol al acabar el proceso.

Se deciden realizar las siguientes dispersiones:

- CA-20+ 8 % NFU
- CA-20+2 % de SBS+ 5 % de NFU
- CA-20+ 3 % SBS



Figura 2 Vista del dispersor y dispersiones

4.2 Características del polvo de NFU

La experiencia internacional en la utilización del polvo de NFU en los procesos de modificación de asfaltos, limita la distribución granulométrica a que esté comprendida

entre un tamaño máximo nominal de 2,0 mm (malla 10 de ASTM) y un tamaño mínimo de 0,063 mm (malla 230 de ASTM). En la tabla 4 se expresa la granulometría de la muestra y los límites recomendados por el Manual de empleo de caucho de NFU en Mezclas Bituminosas del CEDEX España.

Tabla 4. Granulometría del NFU

Tamiz	NFU	Límites P2
Nº 10 (2,00 mm)	100	
Nº 14 (1,40 mm)	100	
Nº 12 (1,00 mm)	100	100
Nº 25 (0,71 mm)	100	100
Nº 35 (0,50 mm)	45,2	10-80
Nº 60 (0,25 mm)	30,5	5-70
Nº 120 (0,125 mm)	14,8	0-30
Nº 230 (0,063 mm)	2,3	0-15

Luego se realizaron las determinaciones físico-mecánicas. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Determinaciones físico-mecánicas

Ensayo	M1
Densidad Relativa (g/cm ³)	1,175
Densidad aparente (g/cm ³)	0,538
Contenido de agua (%)	0,56

Previo a ello se han realizado la separación de los contaminantes con técnicas sencillas. Se apartaron 50 gramos de polvo de caucho y se les pasó un imán para la determinación de restos ferrosos, según recomendación en el programa SIGNUS de España. También, se evaluó el contenido de textiles separando visualmente lo que se observó en cada tamiz al momento de hacer las granulometrías, ver Tabla 6.

Tabla 6. Contenido de impurezas de la muestra

Ensayo	M1	Límites
Residuos ferrosos (%)	0,008	0,01
Residuos textiles (%)	0,23	0,50

Se ha decidido utilizar como referencia un polímero compatible con el cemento asfáltico utilizado en el proyecto, en un 3% sobre el peso de asfalto, permitiendo llegar a los valores exigidos para un asfalto modificado tipo AM-3 según la norma IRAM 6596.

Las propiedades de la muestra recibida son las mostradas en la Tabla 7:

Tabla 7. Propiedades del SBS. Estireno – Butadieno - Estireno

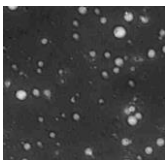

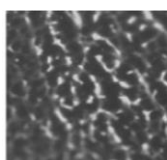
Propiedades del polímero SBS	Valor típico	Método de ensayo
Viscosidad en tolueno 5,23 %/25°C, cSt	12,8	NM 300-11
Materia volátil, % máx.	0,75	ASTM D-5668
Estireno total (sobre polímero), %	33	ASTM D-5775
Estireno bloque, % mín.	31	NM 202-07
Índice de Fluidez, g/10'	< 1,0	ASTM D-1238

Carga de rotura, MPa	18,3	ASTM D-412
Alargamiento, %	775	ASTM D-412

5 Valoración de las dispersiones poliméricas en el asfalto CA-20

Toda la información enunciada se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8. Valoración de las dispersiones poliméricas con la metodología enunciada.

DISPERSIONES POLIMERICAS					
DETERMINACION	ASFALTO ORIGINAL	+8 % NFU	+5%NFU+2%SBS	+3 % SBS	
CLASIFICACION IRAM 6835/6596/ (ARGENTINA)	CA-20	AC-2	AM-3 C	AM-3	
CLASIFICACION FOM 2523/2014 (ESPAÑA)	35/50	BC 50/70	PMBC 45/80-65	PMBC 45/80-65	
PG ASTM D 6373 Y AASHTO M 320	64 (25) -22	70 (22)-22	76 (31)-22	76 (31)-22	
MSCR AASHTO TP 70	R _{0,1}	33,9	45,9	58,6	91,1
	R _{3,2}	16,5	23,4	41,7	91,1
	R diff	51,3	48,9	28,8	0
	J _{nr} (0,1)	0,358	0,232	0,1	0,014
	J _{nr} (3,2)	0,487	0,7	0,17	0,014
	J _{nr} diff	36,1	59,5	47,6	0
MORFOLOGIA UNE EN 13632/10	Continuidad de la Fase	B: fase continua bituminosa		B: fase continua bituminosa	B: fase continua bituminosa
	Descripcion de la fase	H: homogénea		I: No homogénea	I: no homogénea
	Descripcion del tamaño	SL: fracciones pequeñas y grandes		L: fracciones grandes	L: fracciones grandes
	Descripcion de la forma	r: redondeada		O: otra	O: otra
Imagen					

En la Tabla 8, se observan los valores obtenidos en las dispersiones con 8 % de NFU, combinación de 5 % NFU y 2 % SBS y 3 % de SBS (Tabla 8).

Se realiza una comparación entre el marco normativo argentino y el español, debido a que se intenta establecer una correlación principalmente en las clasificaciones, mientras que a su vez en el caso donde resulte insuficiente, ampliar la denominación.

Luego se expresa la evolución en el grado PG, para las diferentes dispersiones realizadas.

Se enumeran además los parámetros que se obtienen del ensayo de MSCR, donde se puede observar el desempeño de las dispersiones para dos niveles de sollicitación. Finalmente se analiza la morfología en base a la normativa UNE EN 13632/10

6. Las mezclas asfálticas en caliente elaboradas

Se formularon mezclas densas con una misma estructura granular y cambios en el tipo de ligante asfáltico

De acuerdo con la clasificación en la que se encuadran las mezclas según el Pliego de especificaciones de la Dirección Nacional de Vialidad, las mezclas que se han de producir son las siguientes, según la Tabla 9:

Tabla 9. Mezcla densa. Combinación con los tipos de asfaltos

TIPO DE MEZCLA	TIPO DE ASFALTO
CAC-D-R-19	CA-20
	CA-20+8% NFU
	CA-20+ 2 % SBS+5%NFU
	CA-20+ 3 % SBS

La estructura granular de la mezcla densa es la que se expresa en la tabla 10.

Tabla 10. Mezcla densa seleccionada

Curva granulométrica de la mezcla de agregados		
Tamices	% que pasa	Curva de la mezcla
25 mm (1")	100	100
19 mm (3/4")	83-100	99,52
9,5 mm (3/8")	60-75	70,84
4,75 mm (Nº4)	42-60	55,53
2,38 mm (Nº8)	29-47	37,86
600 µm (Nº30)	15-29	17,29
300 µm (Nº50)	11-21	13,54
75 µm (Nº 200)	4-8	6,05

6.1. Relaciones volumétricas y mecánicas por el método Marshall

Se buscó determinar el porcentaje óptimo de asfalto para cada tipo de asfalto, ya que en base a la experiencia existen variaciones en el porcentaje cuando se cambia de asfalto convencional a asfalto modificado, y cuando se cambia de agente modificador, como lo es en el caso de sólo SBS, a 100% de polvo de NFU, o combinación de los mismos, tal como se ha propuesto en este trabajo [11].

Las temperaturas de mezclado y de compactación de los distintos tipos de asfaltos han sido las siguientes:

- ✓ Ligante CA-20
Temperatura de mezclado: 152-154°C se considera 153°C
Temperatura de compactación: 140-143°C se considera 141°C
- ✓ Asfalto mejorado con caucho CA-20+8% NFU
Temperatura de mezclado: se considera 165°C
Temperatura de compactación: se considera 155°C
- ✓ Asfaltos modificados

CA-20+ 3 % SBS+5%NFU

CA-20+ 3 % SBS

Temperatura de mezclado: 170-175°C se considera 175°C

Temperatura de compactación: 160-165°C se considera 165°C

En la tabla 11 se vuelcan los resultados del proceso de diseño de las familias de mezclas asfálticas densas, según el método Marshall.

Tabla 11. Valores del ensayo Marshall para diferentes tipos de asfalto.

Dosificaciones de las mezclas densas con los diferentes tipos de asfaltos modificados por el método Marshall						
Parámetro	Unidad	CA-20	8% NFU	3%SBS +5%NFU	3% SBS	Exigencias DNV
% de asfalto óptimo de la mezcla		4,60	4,80	4,70	4,70	
Número de Golpes		75	75	75	75	75
Estabilidad	kN	10,2	11,8	13,2	14,5	>10
Fluencia	mm	3,05	3,90	4,20	4,50	---
Relación Estabilidad/fluencia	kN/mm	3,3	--	---	---	2,5-4,5 (solo convencional)
Densidad Marshall	gr/cm ³	2,413	2,402	2,405	2,422	---
Vacíos	%	3,90	4,30	4,10	4,05	3-5
VAM real	%	15,20	15,60	15,40	14,85	>14
RBV real	%	69,40	71,10	70,90	73,55	65-75
Asfalto absorbido	%	0,23	0,18	0,16	0,19	---
Cv/Cs	%	0,92	0,91	0,95	0,89	< 1,0 conv. <1,1 modif.

En el proceso de diseño han sido considerados los siguientes criterios, los cuales se enuncian, a modo de que pueda quedar registrado [12]:

- ✓ Se ha caracterizado en forma completa los agregados y el filler de aporte
- ✓ Con los diferentes pesos específicos determinados, se han podido calcular la densidad teórica, el porcentaje de asfalto absorbido y las respectivas concentraciones críticas
- ✓ Las mezclas se han compuesto fracción por fracción en cada una de las bandas granulométricas.
- ✓ Se ha considerado para el porcentaje óptimo de asfalto, estar en el entorno del 4 % de vacíos Marshall y superar el 0,5% en la rama descendente de la curva VAM vs % de asfalto.
- ✓ Se han considerado límites a las dispersiones sobre los valores individuales en el proceso de diseño Marshall, con respecto a los valores medios, siendo para la estabilidad un máximo del 10%, para la fluencia un 20% y la densidad Marshall un 1 %.

En la figura 3, se expresan los resultados, con el fin de poder visualizar los efectos producidos por los diferentes tipos de modificadores y de la combinación de los mismos.

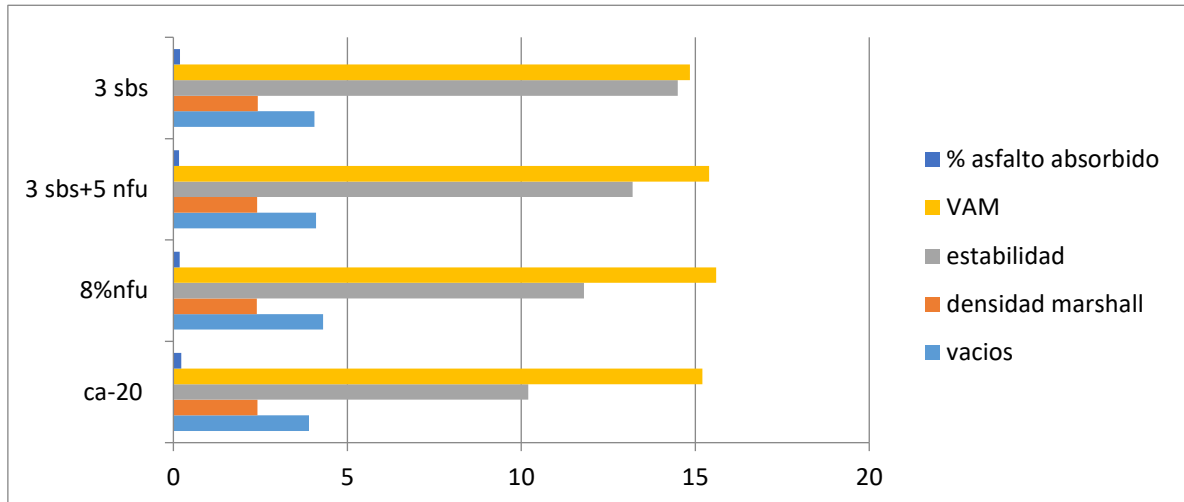


Figura 3 Variación de parámetros volumétricos y mecánicos Marshall

Se puede decir que desde el punto de vista de la dosificación del ensayo Marshall, las dosificaciones obtenidas han permitido hacer el siguiente análisis de los resultados [13]:

- ✓ El porcentaje de cemento asfáltico en las dosificaciones no se ha mantenido constante para la misma estructura de agregados (combinación granular).
- ✓ El asfalto mejorado con 8 % de NFU presenta la mayor dotación de cemento asfáltico.
- ✓ Los asfaltos modificados tanto con polímero virgen como con la mezcla de polímero virgen y polvo de NFU, se ubicaron en una posición intermedia entre el 4,60 % de correspondiente al CA-20 y el 4,80 % del asfalto mejorado con 8 % de NFU
- ✓ Si bien todos los diseños se realizaron con la dosis de asfalto en la que se provoque el 4 % de vacíos Marshall en la mezcla, se percibe un mayor contenido de vacíos en la mezcla diseñada con el asfalto mejorado con 8 % de NFU.
- ✓ Las mezclas asfálticas con incorporación de polvo de NFU presentan mayores valores de VAM.
- ✓ El mayor porcentaje de asfalto absorbido se ha registrado para el ligante asfáltico convencional CA-20.
- ✓ Las mezclas que poseen dispersiones de polvo de NFU presentan menor cantidad de asfalto absorbido.
- ✓ La relación de la concentración volumétrica y concentración crítica se han mantenido en proporciones adecuadas cumpliendo con el pliego.
- ✓ Las temperaturas especificadas para el asfalto convencional, el asfalto mejorado con polvo de caucho y los dos asfaltos modificados que califican como AM-3 han permitido generar un adecuado empaquetamiento de los áridos, con energía de mezclado similar.

6.2. Valoración de la adherencia. Test de Lottman modificado. Norma ASTM D 4867 o AASHTO T 283

Siguiendo el procedimiento determinado en la norma se ha procedido a valorar la adherencia sobre la mezcla, con el porcentaje de vacíos recomendados encontrándose los resultados descritos en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de resistencia conservada.

Parámetro	Unidad	CA-20	8% NFU	3%SBS+5% NFU	3% SBS	Exigencias DNV
Vacíos medios	(%)	7,20	7,50	7,40	7,30	Disp< 5%
TS	Kg/cm ²	7,60	9,50	10,80	12,20	
TH	Kg/cm ²	6,40	8,80	10,60	11,80	
TSR	%	84,21	92,63	98,14	96,72	➤ 80 %

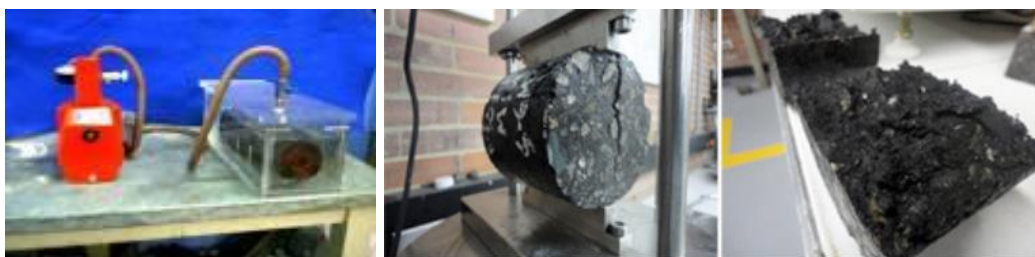


Figura 4. Test de Lottman

En la Figura 5 se muestran en diferentes escalas, la relación de la resistencia en húmedo y seco, el valor del TSR, y la comparación de los valores absolutos alcanzados.

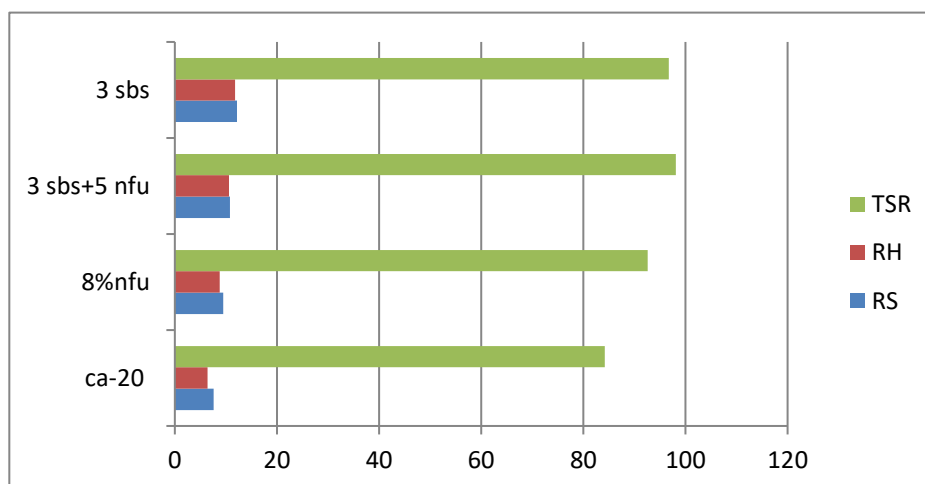


Figura 5 Valores del TSR alcanzados

- ✓ Los valores individuales de las tensiones presentaron una dispersión menor al 5%, respecto al valor medio de cada lote (por cada tipo de ligante asfáltico y condición de ensayo)

- ✓ Los vacíos de las mezclas elaboradas a las temperaturas que se especificaron en el ensayo Marshall se mantuvieron en el entorno del $7\% \pm 1,0\%$, para moldeos de 35 golpes por cara. Se utilizaron los valores de densidades absolutas obtenidas en el ensayo Marshall.
- ✓ La resistencia a tracción indirecta en estado seco muestra un aumento de consideración (25% en referencia al valor obtenido con el asfalto convencional CA-20) con la incorporación del 8% de polvo de NFU, mientras que en estado húmedo RH los cambios han sido del 37 %.
- ✓ Con la adición de SBS, tanto con polvo de NFU, como SBS sólo, los valores absolutos obtenidos son aún mayores, llegando a valores de TSR que han evolucionado del 84 % al orden del 98%.

6.3. Evaluación de la resistencia al ahuellamiento Norma UNE-EN 12697-22-procedimiento B

Se ha procedido a moldear con el equipo roller compact, ajustado a la norma UNE, y según el procedimiento se han ensayado dos probetas [14].

Se debe informar el porcentaje de vacíos alcanzado en las probetas, el cual debe estar comprendido dentro del rango de menos cinco décimas por ciento (- 0,5%) y más uno por ciento (+ 1 %) respecto del porcentaje de vacíos correspondiente a la Fórmula de Obra adoptada. El espesor de la probeta asfáltica debe ser de cincuenta milímetros (50 mm).

Se han utilizado las temperaturas de mezclado y de compactación determinadas en el diseño Marshall. Se han ensayado dos probetas por cada tipo de asfalto. En forma de síntesis se puede realizar la siguiente comparación de los resultados obtenidos y volcados en la tabla 13.

Tabla 13. Síntesis de la resistencia al ahuellamiento

Parámetro	WTS AIR (mm/10³ ciclos de carga) PENDIENTE MEDIA DE DEFORMACION	RDAIR (mm) PROFUNDIDAD DE HUELLA	PRDAIR (%) PROFUNDIDAD MEDIA DE HUELLA
CA-20	0,166	3,560	7,12
8% NFU	0,138	2,650	5,30
2%SBS+5%NFU	0,067	1,810	3,62
3%SBS	0,063	1,635	3,27

En las figuras 6 y 7 se pueden observar, moldeo de las probetas de ahuellamiento y las variaciones registradas con el cambio del cemento asfáltico en WTS, respectivamente

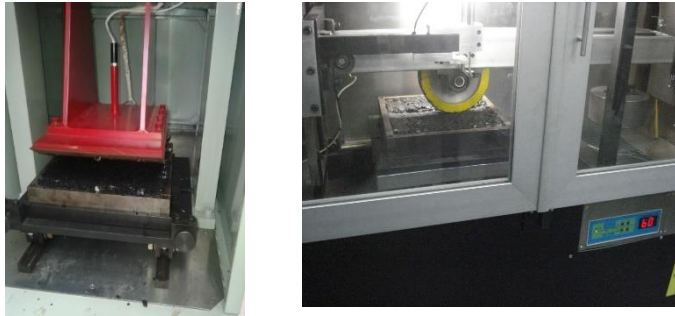


Figura 6 Ensayo de ahuellamiento

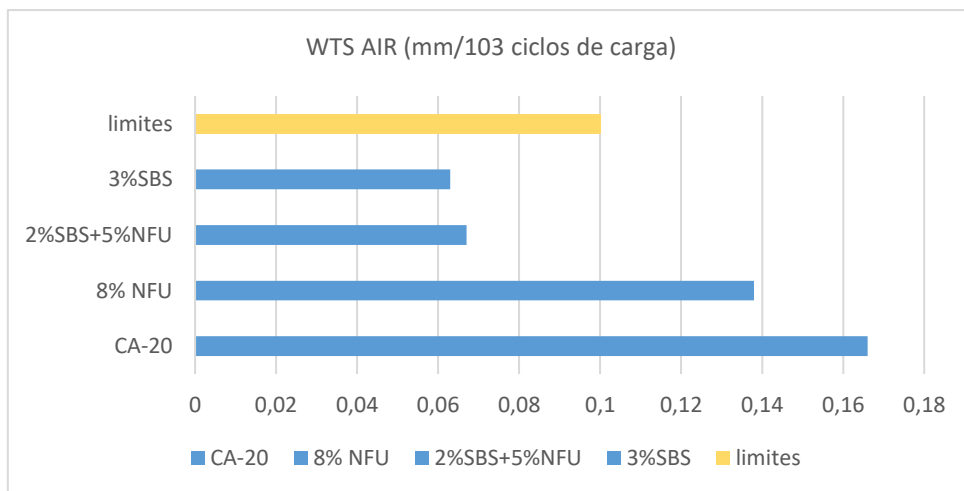


Figura 7 Variación del WTS con el cambio de cemento asfáltico

En el Figura 8, se muestra la variación de la profundidad media proporcional de huella, con el tipo de ligante asfáltico.

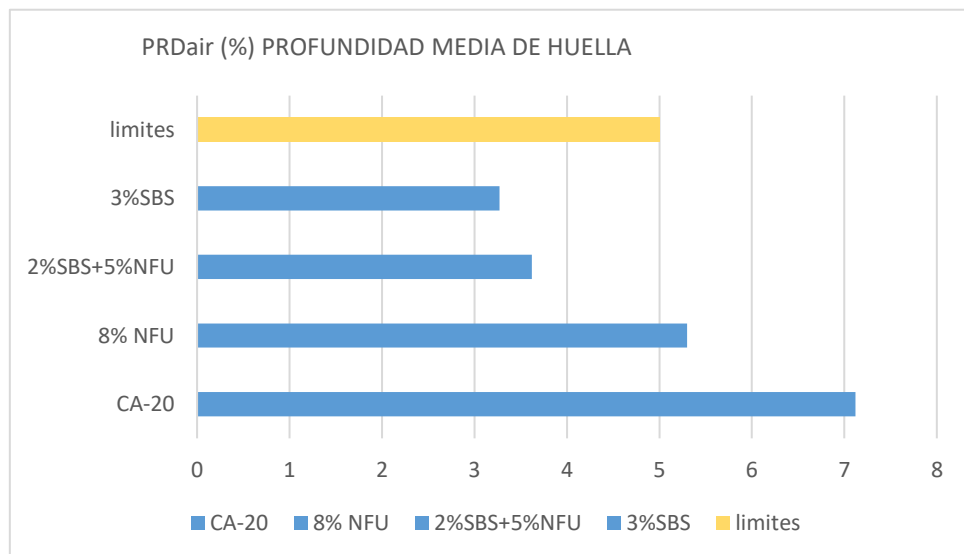


Figura 8 Variación de PRDair con el cambio del tipo de ligante asfáltico

- ✓ La mezcla elaborada con el ligante convencional CA-20, posee una pendiente de ahuellamiento superior a todos los valores exigidos en la especificación

nacional para los diferentes valores de tránsito, aunque la profundidad proporcional de la huella resulta satisfacer la mayoría de los niveles de tránsito.

- ✓ La modificación de CA-20+8% NFU provoca una mejora en la WTS, siendo la mezcla apta para tránsitos T2 y T3 y T4 para capas de rodamiento y base respectivamente, según la especificación nacional.
- ✓ Los valores obtenidos para las mezclas de 3% SBS y 2%SBS+5% NFU cumplen con todas las exigencias explicitadas para capas de rodamiento y de base, para todos los niveles de tránsito.

6.4. Evaluación de la resistencia al punzonado

En cuanto al ensayo de punzonado, el mismo consiste en aplicar a la probeta de mezcla asfáltica una carga a través del vástago a una velocidad de 50,8 mm/min (correspondiente a la velocidad del ensayo Marshall) hasta alcanzar la rotura. El vástago se introduce en la mezcla asfáltica provocando una deformación. Cuando se alcanza la máxima carga P el ensayo se detiene y queda registrada la evolución tanto de la carga como de la deformación “ y ”. Con esos datos es posible calcular la Resistencia al Punzonado “ S_d ” [15].

Trabajos realizados han demostrado que existe una relación entre la resistencia al punzonado y los valores de WTS del ensayo de Wheel Tracking Test. El método propone la realización de probetas Marshall para realizar el ensayo de Punzonado (S_{dP}) y para el ensayo de Rueda Cargada (WTT), a las cuales después de ser ensayadas se le extraerán testigos para realizarles el ensayo de Punzonado (S_{dT}).



Figura 9 vista de las extracciones de testigos y ensayo de punzonado

En primera instancia se analiza la resistencia al punzonado, tanto sobre las probetas moldeadas como sobre los testigos calados. En este caso los valores expresados son los valores medios de las medias informadas en la tabla 14.

Tabla 14. Variación media de la resistencia al punzonado

Tipo de resistencia al punzonado	CA-20	AC-2	AM-3-C	AM-3
Sd (MPa) de probetas Sd _p	8,1	8,9	9,0	14,6
Sd (MPa) de testigos Sd _t	4,2	5,2	5,4	6,9

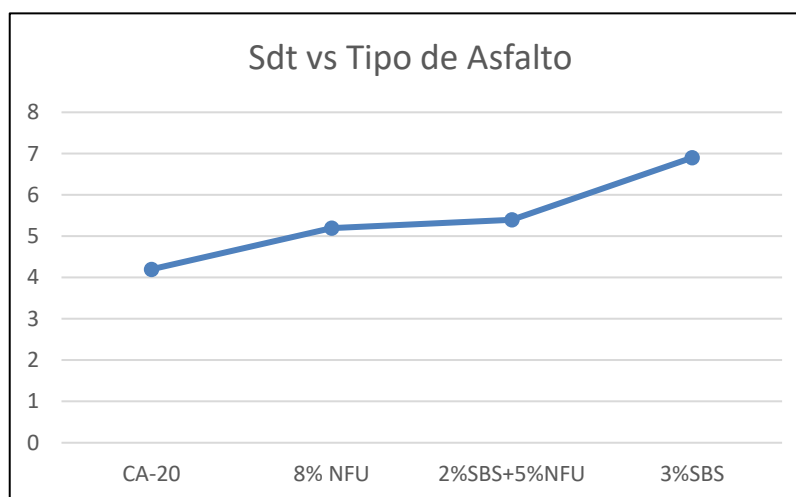


Figura 10 Variación del Sdt en función del tipo de ligante asfáltico

Los valores obtenidos en el ensayo de punzonado en las probetas Marshall moldeadas, como en los testigos extraídos en la probeta de WTT, permiten obtener en ambos casos valores de referencia para la obra, a modo de establecer un control rápido de calidad en cuanto a WTS, desde la correlación que se ha demostrado existe con la resistencia a punzonado Sd. En cuanto a los valores absolutos son superiores en todos los casos a los 3,5 MPa, que se expresan como deseables en las mezclas asfálticas para el caso de testigos extraídos.

La incorporación de 8 % del polvo de caucho produce un cambio de más del 20 % con respecto al valor arrojado sobre la mezcla con el asfalto CA-20, sobre los testigos extraídos. Los impactos del resto de las dispersiones superan la del asfalto mejorado con polvo de NFU, siendo con polímero SBS el que registra mayor grado de desempeño.

7. Análisis de resultados y conclusiones

En Argentina los asfaltos con polvo de caucho se consideran como AC1 y AC2. Esta clasificación resulta similar a los denominados BC 35/50 y BC 50/70, Betunes mejorados con caucho. No existe en nuestro país una clasificación de asfaltos modificados con incorporación de polvo de NFU que cumplan con los límites de los asfaltos modificados y que podrían llevar como en la especificación española alguna identificación que permita vislumbrar la participación del polvo de NFU en un AM-3 por ejemplo, pasando a ser posiblemente AM3-C.

La caracterización del asfalto base CA-20 se ha realizado según la Norma IRAM 6835. Se considera necesario para el proceso de modificación se realice la determinación SARA (ASTM D4124), la cual permite observar la composición en el ligante virgen y envejecido y su carácter tipo sol o gel según el valor del índice de inestabilidad coloidal determinado. A su vez la presencia de resinas y de los Compuestos Orgánicos Volátiles, permite vislumbrar la capacidad de humectación y dispersión de los polímeros en el asfalto de referencia.

La verificación del grado PG del ligante virgen y los asfaltos modificados se condujo conforme a la normativa AASHTO R 29, de conformidad con las especificaciones AASHTO M 320. El objeto de la incorporación de esta metodología consistió principalmente en observar los cambios de PG generados por la incorporación de los porcentajes de polvo de NFU, SBS y su combinación. En la formulación de un asfalto mejorado con 8% de polvo de NFU se produce, como aporte de significación, el aumento de un grado de PG (6°C) en la temperatura alta del PG. Otro aspecto de significación es que se puede tener asfalto modificado del tipo AM-3 no sólo con 3 % de SBS, sino también con 2 % de SBS + 5 % de NFU. Para este caso se produce un salto de 2 grado PG (12°C).

Se recomienda además realizar el ensayo de microscopía con fluorescencia óptica bajo las condiciones operativas fijadas en la norma UNE-EN 13632-2010. Esta norma establece el protocolo de ensayo, los ajustes de las longitudes de onda y espectros. En base a ello, se dan 4 códigos en letras que permiten calificar la homogeneidad o no de la dispersión, su continuidad o no, su forma y su tamaño.

El ensayo MSCR de creep y recuperación (creep and recovery) se plantea como una técnica esencial a la hora de valorar la estabilidad de la dispersión polimérica bajo estados de sollicitación. Esta prueba también utiliza el DSR, con muestras envejecidas a través del RTFO. Protocolo de ensayo es la AASHTO TP 70. La dependencia al esfuerzo aplicado en el ligante (creep compliance no recuperable), disminuye mientras más rígido es el ligante. Además, la diferencia porcentual de creep compliance no recuperable ante distintos niveles de esfuerzo, se mantiene bajo 75 % para todos los casos, es decir, en un límite seguro para minimizar la contribución del ligante a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en servicio. Cabe mencionar, que de acuerdo a los resultados obtenidos de Jnr, los ligantes menos rígidos son menos susceptibles a los cambios de esfuerzo de corte. Con la metodología descrita para la caracterización de los ligantes convencionales y modificados, se puede valorar incluso la estabilidad y rigidez de las dispersiones bajo estado de sollicitación, demostrando en todos los casos buen desempeño. Las dispersiones con polvo de NFU también han cumplido con los estándares para las temperaturas de ensayo.

El porcentaje de cemento asfáltico en las dosificaciones no se ha mantenido constante para la misma estructura de agregados (combinación granular). El ensayo Marshall ha arrojado las siguientes conclusiones:

El mayor porcentaje de asfalto absorbido se ha registrado para el ligante asfáltico convencional CA-20. Luego se mantiene estable en el resto de los asfaltos

modificados y/o mejorados. Las mezclas que poseen dispersiones de polvo de NFU presentan menor cantidad de asfalto absorbido.

En cuanto al ensayo del Test de Lottman se puede decir que: Los valores individuales de las tensiones presentaron una dispersión menor al 5%, respecto al valor medio de cada lote (por cada tipo de ligante asfáltico y condición de ensayo). La resistencia a tracción indirecta en estado seco muestra un aumento de consideración (25% en referencia al valor obtenido con el asfalto convencional CA-20) con la incorporación del 8% de polvo de NFU, mientras que en estado húmedo RH los cambios han sido del 37 %. Con la adición de SBS, tanto con polvo de NFU, como SBS sólo, los valores absolutos obtenidos son aún mayores, llegando a valores de TSR que han evolucionado de un 84 % a valores del orden de 98%.

En cuanto al ensayo de Wheel Tracking Test los resultados permiten decir que:

La mezcla elaborada con el ligante convencional CA-20, tiene una pendiente de ahuellamiento superior a todos los valores exigidos, aunque la profundidad proporcional de la huella resulta satisfacer la mayoría de los niveles de tránsito.

La modificación de CA-20+8% NFU provoca una mejora, siendo la mezcla apta para tránsitos T2, T3 y T4 para capas de rodamiento y base respectivamente.

Los valores obtenidos para las mezclas de 3% SBS y 2%SBS+5% NFU cumplen con todas las exigencias explicitadas para capas de rodamiento y de base

En el ensayo de punzonado se observa un incremento en todas las tensiones Sdt convalidando los resultados que se obtuvieron en el ensayo de ahuellamiento.

El uso de polvo de NFU generando asfalto mejorado o modificados, es una alternativa que produce mejoras en la reología del ligante asfáltico, ampliándose los beneficios al efecto sobre una mezcla asfáltica densa que se mantuvo su esqueleto granular constante, verificando su mejora en el desempeño en la resistencia al ahuellamiento, en la adherencia, la resistencia al punzonado, y las relaciones volumétricas del ensayo Marshall.

8. Referencias

- [1] Potti, J. (2013). "Betún modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso. Otro tipo de reciclaje". Grupo PROBISA. Madrid, España.
- [2] PG3 artículo 542 Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso (2015). Boletín Oficial del Estado Español. Madrid, España.
- [3] PG3 artículo 543 Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. (2015). Boletín Oficial del Estado Español. Madrid, España.
- [4] Gaspar, A. (2016). Reología de los cementos asfálticos. TA Instruments. Houston. Texas, USA.
- [5] Schimizza, R. (1994). Use of Waste Rubber in Light-Duty Concrete Pavements, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, Third Materials Engineering Conference, San Diego, California, pp. 128-132.
- [6] Montejo, A. (2006). Ingeniería de pavimentos: evaluación estructural, Obras de mejoramiento y nuevas tecnologías, Tomo 2, 3ª ed., Bogotá, Universidad Católica de Colombia, pp. 91-93.

- [7] Bergareche, E. (2004). Optimización de la composición y procesado de betunes modificados con polímeros reciclados Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).
- [8] UNE EN 13632-2010. Visualización de la dispersión de polímeros en betunes modificados con polímeros.
- [9] Rowe, G. M., & Anderson, D. A. (2012). RHEOBIT introduction. 35. Lexington, USA
- [10] Bahia, H. (2009). Modeling of asphalt binder rheology and its application to modified binders. In Y. R. Kim, Modeling of asphalt concrete (p. 11). McGraw-Hill.
- [11] Kuo, C.-Y. (2002). Correlating permanent deformation characteristics of hot mix asphalt with aggregate geometric irregularities. *Journal of Testing and Evaluation*, 30(2), 143.
- [12] Carlson, K. (2014). 10 reasons to switch to the AASHTO MP19: Consider the performance based asphalt binder specification. *Asphalt. The Magazine of the Asphalt Institute*, 29(1), 21-23.
- [13] Botasso, H. (2007). "Inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas" UTN La Plata. La Plata: Polycromo.
- Asphalt Institute. (2001). *Superpave Mix Design* (Third ed.). Lexington.
- [14] Padilla Rodríguez, A., (2002). Comportamiento a la deformación permanente de las mezclas asfálticas en caliente. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona: España.
- [15] Angelone, S. (2013). Comportamiento de materiales viales. Diseño y control de mezclas asfálticas frente a las deformaciones plásticas permanentes. Tesis doctoral. IMAE. Laboratorio Vial. Universidad Nacional de Rosario. Rosario: Argentina.