

# CARRETERAS SUSTENTABLES. TRAMO EXPERIMENTAL CON MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON PLÁSTICOS RECICLADOS

Marina Cauhape Casaux<sup>1</sup>, Luis Zorzutti<sup>2</sup>, Fernando Martínez<sup>3</sup>,  
Silvia Angelone<sup>4</sup>, Marcela Balige<sup>5</sup>, Gerardo Lucci<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, mccasaux@fceia.unr.edu.ar

<sup>2</sup> Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, luis.zorzutti@hotmail.com

<sup>3</sup> Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, fermar@fceia.unr.edu.ar

<sup>4</sup> Lab. Vial IMAE-FCEIA-UNR, Riobamba y Berutti. Rosario, sangelon@fceia.unr.edu.ar

<sup>5</sup> YPF, Macacha Güemes 515, CABA, marcela.balige@ypf.com

<sup>6</sup> Unidad Ejecutora Corredor Vial N°4 de RP18, Santa Fe, creeryar@yahoo.com.ar

## Resumen

En el laboratorio Vial-IMAE-FCEIA-UNR, desde hace más de cuatro décadas, se llevan a cabo diferentes proyectos orientados hacia el empleo de residuos de distintos orígenes como materiales de uso vial. Actualmente, se encuentra en vigencia un proyecto tendiente a investigar el uso de plásticos reciclados provenientes de Silo Bolsa y envases de fitosanitarios en mezclas asfálticas, realizándose experiencias a nivel laboratorio: ensayos de dosificación y caracterización físico-mecánicos. Como cierre de dicho plan se gestionó conjuntamente con distintos actores públicos y privados (Laboratorio Vial IMAE-FCEIA-UNR, YPF, Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA), y Unidad Ejecutora Corredor Vial N°4 de RP18) la realización de una experiencia in situ para verificar si en el camino se cumplen las ventajas observadas en los estudios de laboratorio. Se define entonces el proyecto PASOS (PAVimentos SOStenibles), cuyo objetivo principal es aportar a la Sustentabilidad del Medio Ambiente, convirtiendo desechos en nuevos productos, evitando su proliferación en vertederos. Este trabajo presenta entonces la incorporación de plásticos reciclados por vía húmeda y seca en mezclas asfálticas para emplearlas en un tramo experimental; se analizan resultados y observaciones obtenidos durante su elaboración en planta, su distribución, compactación y el seguimiento de su comportamiento en servicio.

**Palabras Clave:** Residuos plásticos reciclados, asfaltos modificados, polietileno, energía, mezclas asfálticas.

## 1 Introducción

En el mundo actual, la consideración del aspecto sustentable en el desarrollo de nuevos proyectos se ha tornado sumamente importante. Su índole abarcativa implica una estrecha relación entre economía, sociedad y ambiente garantizando el crecimiento y progreso actual sin comprometer a las posibilidades de las generaciones futuras.

Tomar conciencia de la importancia de lograr un proyecto sustentable surge como resultado del análisis de situaciones que diariamente acontecen a lo largo del mundo, tales como crecimiento de la población, aumentos en los consumos energéticos y por ende de emisiones, mayor demanda de alimentos, traslado de la

población del campo a la ciudad con demanda de infraestructura y suministros, aumento del volumen y diversidad de residuos.

En particular, en la Ingeniería Vial, donde la construcción de rutas es considerada una de las industrias con mayor consumo de materiales en el mundo y en consecuencia, con grandes efectos tanto económicos como ambientales, la sustentabilidad está enfocada fundamentalmente en la reducción de la huella de carbono (CO<sub>2</sub>) en toda la vida de una carretera, desde la obtención de los materiales para su construcción y mantenimiento, hasta el fin de la vida útil o en servicio de la misma. Las distintas estrategias se centran en mejorar los diseños geométricos y estructurales de los pavimentos mediante métodos más confiables basados en principios mecánicos, el logro de espesores de mezclas asfálticas más delgadas y con mayores vidas de diseño, técnicas más eficientes de conservación de pavimentos, uso de mezclas asfálticas tibias o frías (implican menores temperaturas en el mezclado y compactación), menor uso de materiales vírgenes, menor consumo de energía durante el proceso de construcción y servicio y uso de materiales reciclados y residuos (neumáticos, membranas y tejas asfálticas para techos, escoria de acería, residuos de la construcción, plásticos, entre otros).

Huang et al. [1] Investigaron sobre el uso de desechos sólidos en la construcción de pavimentos flexibles y concluyeron que el uso de éstos en mezclas asfálticas presenta una valiosa oportunidad, pero es responsabilidad de la “industria del asfalto” encontrar la fuente apropiada de origen de los materiales a reciclar y usarlos de manera adecuada en los pavimentos asfálticos con vistas a lograr una solución tanto técnica como financieramente posible de plasmar.

Continuando con esta tendencia en el empleo de residuos en pavimentos, particularmente residuos plásticos, Hinishoglu & Agar [2] estudiaron sobre el uso de polietileno de alta densidad reciclado como modificador de asfaltos para su uso posterior en mezclas asfálticas y concluyen que estas mezclas proveen mejor resistencia a las deformaciones permanentes debido a su alta estabilidad Marshall. Attaelmanan et al. [3] también analizaron la factibilidad de usar polietileno de alta densidad como modificador de materiales asfálticos en pavimentos y los resultados obtenidos permiten observar que su desempeño es mejor que el de las mezclas convencionales y que la susceptibilidad térmica y a la humedad puede ser reducida con el agregado de polietileno. Conclusiones similares son informadas por Zoorob & Suparma [4]. En estos estudios el polietileno fue adicionado solamente por vía húmeda obteniéndose un cemento asfáltico modificado. Respecto a antecedentes de la incorporación de polietileno en las mezclas asfálticas por vía seca, en la que el polietileno se incorpora como una fracción de áridos, los mismos son escasos y limitados sólo a su dosificación y no a la caracterización de su comportamiento mecánico. A partir del año 2012, Cauhapé Casaux et al [5] en la Universidad de Nacional de Rosario (UNR), publicaron las primeras experiencias, en la Argentina, sobre la incorporación de plástico reciclado por vía seca en mezclas asfálticas en forma de escamas (triturado) y pellets. Puntualmente en 2016, Angelone et al [6] efectúan un análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con incorporación de polietileno por vía seca y húmeda y concluyen que en ambos casos las mezclas son más resistentes a las deformaciones permanentes. También se estudiaron asfaltos modificados con diferentes porcentajes de polietileno micronizado, los resultados indican un cambio significativo en sus propiedades reológicas a medida que aumenta el porcentaje de plástico incorporado [7]. En 2020

Plastics Industry Association de USA, el Ncat y Western Research Institute confirman los resultados alcanzados [8].

La idea de usar plásticos no degradables en los pavimentos permite utilizar una gran cantidad de residuos existentes y reciclarlos en el camino. Con esto se contribuye fuertemente a implementar acciones de transferencia en iniciativas vinculadas con el uso sustentable de los residuos y de la carretera. Esto resulta de vital importancia, dado que en nuestro país, por un lado estadísticas de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Argentina muestran que los residuos plásticos urbanos (materiales difícilmente biodegradables que ocupan importantes volúmenes de vertederos) representan aproximadamente un 15 % del total de residuos sólidos urbanos y del cual el 41% es polietileno de baja densidad [9]. Por otra parte, de acuerdo a investigaciones de la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) [10] los residuos rurales, que incluyen plásticos provenientes de Silos Bolsas y bidones (envases de productos fitosanitarios), alcanzan un volumen de 70.000 toneladas por año, generando enormes cantidades de plástico de desecho, que permanecen en las zonas rurales. En la búsqueda de una solución concreta ante este problema ambiental ACA, junto a sus Cooperativas Asociadas construyeron una Planta de Recupero de Residuos Plásticos. Su objetivo es el recupero de los residuos plásticos del campo, en un volumen equivalente al que genera ACA por la producción y comercialización de Silos Bolsas y Bidones, prologando así el ciclo de vida de los plásticos mediante la transformación de los mismos en una nueva materia prima para diversos usos industriales. A través de este emprendimiento, ACA se convierte en la primera empresa que produce y distribuye fitosanitarios y Silos Bolsas, y que al mismo tiempo recupera los envases vacíos. La Planta de Recupero se encuentra equipada con tecnología europea de última generación para procesar bidones de fitosanitarios y Silos Bolsas usados. Ubicada en el parque industrial de Cañada de Gómez, Santa Fe, cuenta con capacidad para procesar 7.000 toneladas de plástico por año. Figura 1, [10].

Basados en la misma premisa de disponer responsablemente los residuos, se llevan a cabo diferentes investigaciones dentro de la UNR basadas en el empleo de plásticos reciclados para la elaboración y caracterización de mezclas. Se obtuvieron excelentes resultados a nivel de laboratorio. [5, 6, 7, 11, 12, 13, 14]

En base a ello se concreta el proyecto PASOS (PAvimentos SOSTenibles), el cual se enmarca dentro de las actividades de Investigación, Innovación y Vinculación Tecnológica de la Universidad Nacional de Rosario, UNR. El mismo tiene como objetivo principal aportar a la Sustentabilidad del Medio Ambiente, convirtiendo desechos en nuevos productos, evitando la proliferación de vertederos. Se lleva adelante con la participación conjunta de distintos actores públicos y privados: el Laboratorio Vial – IMAE de la Facultad de Ingeniería de la UNR, YPF, petrolera con sede en la Argentina, la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA), institución privada, la Unidad Ejecutora Corredor Vial N°4 de la ruta provincial RP18 y la Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe (Argentina). Dentro del mismo se plantea la construcción del Primer Tramo Experimental de pavimento con plásticos reciclados en Argentina ubicado sobre la ruta provincial RP N° 18, Santa Fe, Argentina. Sus objetivos son contribuir a la mejora del medioambiente, realizar una efectiva vinculación entre distintas empresas privadas y públicas con la Universidad y específicamente verificar si en el camino se cumplen las ventajas observadas en los estudios de laboratorio. Se pone énfasis en la elaboración del asfalto modificado

por vía húmeda en la planta y su uso en la mezcla asfáltica, así como la incorporación del plástico por vía seca directamente en la mezcla asfáltica, su colocación y compactación. Adicionalmente se llevará a cabo, luego de construido, un seguimiento del tramo durante un período de dos años ya que se considera que es muy importante solicitar este material al tránsito de camiones con vistas a encontrar una solución para mejorar el estado de los caminos y contribuir con la reducción de la contaminación ambiental.



Figura 1. Planta de Reciclado ACA. Silo Bolsas y Bidones

En este trabajo se presenta entonces la incorporación de plásticos reciclados por vía húmeda y seca en mezclas asfálticas para su empleo en un tramo experimental; se presentan resultados y observaciones obtenidas durante su elaboración en planta, su distribución, compactación y seguimiento en servicio.

## 2 Tramo experimental

La ejecución del tramo experimental que se presenta en este trabajo constituye una parte esencial dentro del Proyecto Pasos. Para su construcción se selecciona la Ruta Provincial N°18 de la Provincia de Santa Fe, esta elección se basa en varias consideraciones: la gran cantidad de tránsito de camiones que tiene (en 2018, año en que se construye, para el carril descendente, 3200 TMDA con 25% de vehículos pesados), la excelente predisposición de la empresa constructora, la disponibilidad de un molino para modificar el asfalto ubicado en la planta, la proximidad a la ciudad de Rosario, contar con la autorización de la Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe para la intervención de la ruta y la provisión del asfalto por parte de YPF y del plástico reciclado a través de ACA. La empresa constructora cuenta con el siguiente equipamiento:

- *Planta Asfáltica: FISA 32 Ton/h*
- *Molino: SOLGA 3000 rpm, 40 KVA*
- *Terminadora: Dynapac 11011*
- *Compactación: Neumático Tema Terra 8 t y Combinado: Aman 5 t*

Se analiza entonces la posibilidad del uso de dos tipos de plásticos reciclados a incorporar al asfalto cuyo origen corresponde a ACA:

- SB, pellets de Polietileno de baja densidad proveniente de Silos Bolsas, color negro, en forma de lenteja, con un tamaño aproximado de 4 mm, con una densidad media de 0.913Kg/dm<sup>3</sup>, tal como se muestra en la Figura 2.
- B, pellets de Polietileno de alta densidad proveniente de Bidones, color verde, en forma de lenteja, con el mismo tamaño que los SB, con una densidad media de 0.930Kg/dm<sup>3</sup>, tal como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Plástico reciclado de ACA en forma de pellets

La incorporación del plástico reciclado al asfalto se realiza por “vía húmeda” (VH), obteniendo un “ligante asfáltico modificado” y diseñando así la mezcla asfáltica en caliente que luego será colocada en el tramo correspondiente. El uso de estos materiales como capa de rodamiento es la situación más desfavorable, ya que se considera que su mejor aplicación sería como capa de base.

Se programa la construcción de 5 tramos a saber:

- Tramo 1 con mezcla asfáltica elaborada con incorporación del plástico proveniente de SB, Silos Bolsas, por vía seca: CAC– CA20+SBVS
- Tramo 2 con mezcla asfáltica elaborada con asfalto modificado con el plástico proveniente de SB, Silos Bolsas, por vía húmeda: CAC–CA20+SBVH
- Tramo 3 con mezcla asfáltica elaborada con incorporación del plástico proveniente de B, Bidones, por vía seca: CAC–CA20+BVS
- Tramo 4 con mezcla asfáltica elaborada con asfalto modificado con el plástico proveniente de B, Bidones, por vía húmeda: CAC–CA20+BVH
- Tramo 5 de control con mezcla asfáltica elaborada con asfalto CA30: CAC–CA30

## 2.1 Ubicación de los tramos

Durante diciembre de 2018 y enero de 2019 se construyeron los cinco tramos experimentales sobre el carril descendente de la ruta RP18, el más cargado. Cada uno de ellos tiene una longitud aproximada de 100 m. En el carril ascendente sólo se usa SB, Silos Bolsas, por vía húmeda. En la Figura 3 se presenta el esquema de los mismos.

Inicio en el Km 11.00 de la RP N°18

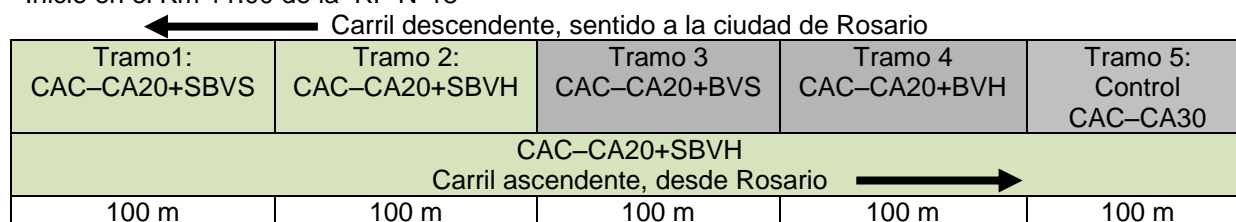


Figura 3. Distribución de los tramos experimentales

### 3 Materiales

En este capítulo se describen los materiales utilizados en el estudio: plástico reciclado, ligantes asfálticos y mezclas asfálticas.

#### 3.1 Plástico reciclado

Los materiales plásticos empleados en el tramo son provistos por ACA (SB y B). A modo comparativo se presenta el polietileno micronizado (M), que fuera estudiado en trabajos anteriores [15], Tabla 1:

Tabla 1. Plásticos reciclados

Plástico reciclado	Densidad, Kg/dm <sup>3</sup>	Tamaño, mm	Color
SB, Polietileno de baja densidad (Figura 2)	0.913	4.0	negro
B, Polietileno de alta densidad (Figura 2)	0.930	4.0	verde
M, Polietileno de baja densidad micronizado (Figura 4)	0.925	0.1 – 2.0	negro

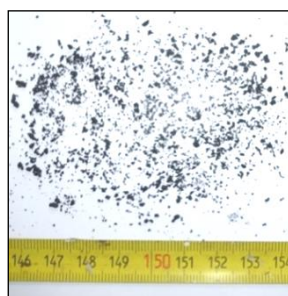


Figura 4. Aspecto del Polietileno reciclado micronizado

#### 3.2 Ligantes asfálticos

Se han empleado para este proyecto, asfalto tipo CA30 y modificado comercial tipo AM3, considerados asfaltos de control y asfalto base tipo CA20, al cual se han incorporado el polietileno reciclado en pellets de SB y B y micronizado M. El empleo de este asfalto como base y el porcentaje de incorporación de los plásticos (3% en peso) se basan en resultados de estudios anteriores [15].

#### 3.3 Mezcla asfáltica

Para el estudio se parte de la premisa de no modificar las tareas que se están llevando a cabo en la obra, o sea se respetan los materiales y la dosificación de la mezcla asfáltica que se está usando, así como las dimensiones de la carpeta de rodamiento. Las mezclas asfálticas mencionadas corresponden a la capa de rodamiento con un espesor entre 35 mm y 40 mm y un ancho de 3.65m. La composición de la mezcla de control CAC-CA30 se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición mezcla de control CAC-CA30

6- 19	0-6	cal	Asfalto	Total
37.05 %	57.00 %	0.95 %	5.00 %	100.00%

Para las mezclas con plásticos reciclados por vía húmeda se mantienen los mismos porcentajes y se usa en lugar del CA30 un asfalto CA20 modificado con el plástico. Para esta experiencia se opta por usar el 3% de plástico respecto al porcentaje de asfalto total, o sea un 0.15% respecto al total de la mezcla asfáltica. Para las mezclas con plásticos reciclados por vía seca se agrega directamente un 2 % de plásticos sobre el total de la mezcla sin cambiar los otros porcentajes dado que se considera que los pellets se van a incorporar al mástico.

### *3.3.1 Mezclas con incorporación de plástico por vía seca (VS)*

Para obtener mezclas con incorporación de plástico reciclado en forma de pellets por vía seca, tanto para los provenientes de Silos Bolsas como de Bidones, se incorpora un 2 % sobre el total de la mezcla asfáltica, como se mencionó anteriormente y se lo efectúa de la siguiente forma:

- a. Se calcula la cantidad de plástico necesario
- b. Se calcula la cantidad de cal necesaria
- c. Se premezcla en una mezcladora la proporción necesaria de pellets y cal y se lo embolsa previamente a la colocación de la misma en el Silo de incorporación de filler.
- d. Se introduce la premezcla plástico-cal al tambor mezclador a través del Silo de incorporación de filler.
- e. La mezcla se elabora a 170 °C aproximadamente con asfalto tipo CA20 sin modificar

### *3.3.2 Mezclas con incorporación de plástico por vía húmeda (VH)*

Para obtener mezclas con incorporación de plástico reciclado en forma de pellets por vía húmeda, se incorpora un 3% del mismo sobre el total de ligante asfáltico CA20. La elaboración de los asfaltos modificados con SB y B fue realizada en la PLANTA de elaboración de mezclas asfálticas (Corredor Vial N°4 RPN°18), Figura 5a. y se lo efectúa de la siguiente forma:

- a. Se modifica el asfalto CA20 en un molino in situ. Para esta experiencia se trabaja con 2 toneladas de asfalto cada vez.
- b. Se precalienta el asfalto CA20 a 170 °C y se incorpora el plástico reciclado en forma de lluvia de pellets.
- c. Se mezcla hasta que se evidencia un asfalto sin grumos, brillante y parejo. Para el SB requirió de 2 a 3 horas de mezclado y para el B de 3 a 5 horas.
- d. Una vez obtenido el asfalto CA20 modificado con plástico se lo bombea de igual forma que el asfalto convencional para la elaboración de la mezcla asfáltica.

El tiempo de agitación dentro del molino se controló en forma visual hasta lograr un asfalto homogéneo y brillante que indica una buena incorporación del plástico en el ligante (Figura 5b a 5f).





Figura 5. Aspecto del ligante CA20 modificado con plástico reciclado

#### 4 Construcción de tramos experimentales

##### 4.1 Construcción del tramo con CAC–CA20+SBVS

En la Figura 6 se observa la colocación y compactación de la mezcla asfáltica con plástico reciclado con polietileno de baja densidad (Silos Bolsas) por vía seca, CAC–CA20+SBVS. Durante el proceso se tomaron imágenes termográficas desde la salida de la Planta Asfáltica hasta su colocación. Las temperaturas a la salida de la Planta Asfáltica - a la entrada de los cangilones - están alrededor de los 190 °C, en camión oscilan entre los 154°C y 175 °C. En la terminadora la medición localizada indica una temperatura entre 115°C y 162 °C. A la salida de la misma se registran entre 150°C y 160°C. Se observa falta de trabajabilidad de la mezcla una vez que pierde temperatura. En la Figura 7 se muestra una mezcla asfáltica uniforme, no se observan a simple vista los pellets incorporados y si se ve que se pueden formar hilos con el polietileno. La superficie terminada presenta heterogeneidades debido al proceso constructivo con un material de comportamiento distinto a la mezcla convencional, fundamentalmente en los últimos metros del tramo donde la mezcla se encontraba fría. Esto trae aparejado la necesidad de un bacheo localizado a los 7 días de colocada. Se destaca la importancia de contar con equipos adecuados y en buen funcionamiento para la distribución, colocación y compactación de la mezcla modificada por vía seca y que la temperatura no sea inferior a los 140°C.

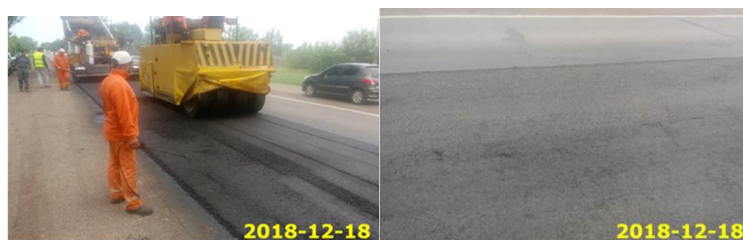


Figura 6. Construcción del tramo con CAC–CA20+ SBVS



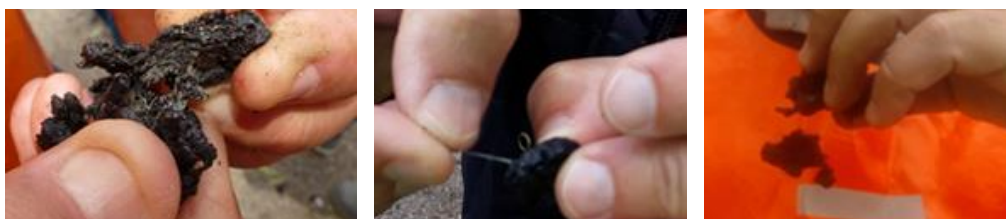


Figura 7. Hilos plásticos dentro de la mezcla CAC-CA20+SBVS colocada

#### 4.2 Construcción del tramo con CAC-CA20 +SBVH

A continuación del tramo anterior se construye el tramo con mezcla asfáltica elaborada con asfalto CA20 modificado con plástico reciclado de baja densidad por vía húmeda, CAC-CA20+SBVH. De acuerdo a las imágenes termográficas las temperaturas a la salida de la Planta Asfáltica - a la entrada de los cangilones - están alrededor de los 200 °C, en camión oscilan entre los 167°C y 198 °C. En la terminadora la medición localizada indica una temperatura entre 148°C y 169 °C. A la salida de la misma se registran entre 140°C y 164°C. La mezcla tiene un aspecto similar a una mezcla convencional, Figura 8. La distribución y compactación es mucho más fácil que con la mezcla CAC-CA20+SBVS. Se aprecia que la terminación superficial es similar a la de la mezcla convencional.



Figura 8. Mezcla CAC-CA20+SBVH

#### 4.3 Construcción del tramo con CAC-CA20+BVS

Durante la construcción del tramo con CAC-CA20+BVS se observa que se ha mejorado la técnica de distribución y compactación de la mezcla asfáltica con pellets provenientes de Bidones por vía seca respecto al primer tramo con la mezcla CAC-CA20+SBVS. No obstante, todavía la plancha de la terminadora arrastra material cuando se enfría la mezcla por debajo de los 140 °C. En la Figura 9 se observa el aspecto terminado de esta mezcla asfáltica.



Figura 9. Aspecto superficial de la mezcla CAC-CA20+BVS

#### 4.4 Construcción del tramo con CAC–CA20+BVH

La colocación y compactación de la mezcla asfáltica con plástico reciclado con polietileno de alta densidad (Bidones) por vía húmeda, CAC–CA20+BVH ha sido más fácil que con los otros tramos debido a la experiencia previa adquirida por el personal de obra. Las imágenes termográficas indican a la salida de la planta temperaturas que oscilan entre los 183 y 197 °C, en el camión entre 140 y 172 °C. La mezcla se presenta uniforme a la salida de la planta, sin ninguna particularidad que observar, tiene una buena envuelta de los agregados pétreos, Figura 10.



Figura 10. Aspecto de la mezcla CAC–CA20+BVH

#### 4.5 Construcción del tramo con CAC –CA30, mezcla de control

A continuación de los tramos con plástico reciclado se construye el tramo de control con mezcla asfáltica densa con asfalto CA30. Como ha sido mencionado, se mantiene el mismo esqueleto granular y solo se cambia el tipo de ligante asfáltico. El aspecto superficial es similar al de los otros tramos.

### 5 Ensayos experimentales y análisis de resultados

#### 5.1 Ensayos sobre Ligantes asfálticos de base y control

La Tabla 3 muestra las características de los asfaltos de base y control y las normas seguidas. Adicionalmente en esta etapa se ha considerado un asfalto modificado con polímeros designado como AM3 a modo comparativo de las modificaciones que produce un polímero comercial respecto a la adición de los plásticos reciclados.

Tabla 3. Características generales del asfalto base y de los de control

Ensayo	CA20	CA30	AM3	Norma
Penetración a 25°C, dmm	85.7	59.8	59.7	IRAM 6576:2004
Punto de Ablandamiento, °C	46.0	48.6	80.5	IRAM 6841:2011
$G^*$ a 60°C, KPa	1.95	3.11	7.16	ASTM D 7175:2008
$\delta$ a 60°C, °	85.8	85.4	60.9	ASTM D 7175:2008
$G^* \times \text{sen}\delta$ a 60°C, KPa	1.94	3.10	6.26	
$G^* / \text{sen}\delta$ a 60°C, KPa	1.96	3.12	8.19	
Recuperación elástica por torsión, %	5.0	5.0	82.2	IRAM 6830:2011
Viscosidad 135°C, S21, dPas	4.50	5.50	44.56	IRAM 6837:2011
Velocidad de corte, 135°C, rpm	20.0	20.0	5.0	

## 5.2 Ensayos sobre Ligantes asfálticos modificados

Los resultados de los ensayos de caracterización de ambos asfaltos modificados, en el molino en obra, y las del asfalto modificado con PE micronizado se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características generales de los asfaltos modificados

Ensayo	CA20+3%SB	CA20+3%B	CA20+3%M
Penetración a 25°C, dmm	47.5	40.0	50.5
Punto de Ablandamiento, °C	66.7	65.5	68.1
G* a 60°C, KPa	11.7	8	5.39
$\delta$ a 60°C, °	72.2	80.7	82.0
G* x sen $\delta$ a 60°C, KPa	11.14	7.89	5.34
G* / sen $\delta$ a 60°C, KPa	12.30	8.11	5.44
Recuperación elástica por torsión, %	15.0	15.5	22.8
Viscosidad 135°C, S21, dPas	9.73	9.21	16.50
Velocidad de corte, 135°, rpm	10.0	10.0	20.0

## 5.3 Análisis comparativo de resultados para los asfaltos base, de control y modificados con SB, B y M

### 5.3.1 Penetración y punto de ablandamiento

Se observa una disminución de la Penetración e incremento del Punto de Ablandamiento en los asfaltos modificados con una tendencia hacia los valores correspondientes al ligante AM3 tal como se muestra en la Figura 11.

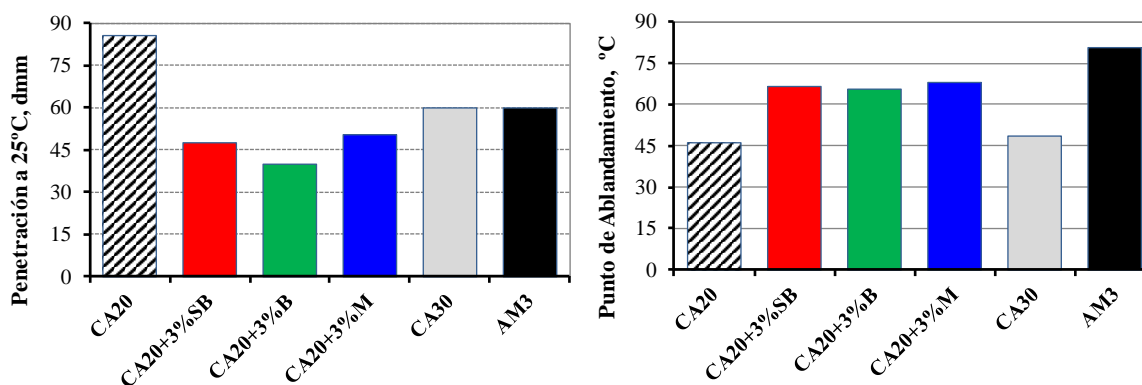


Figura 11. Penetración y Punto de Ablandamiento de los distintos ligantes asfálticos

### 5.3.2 Viscosidad

Para los resultados obtenidos en el Viscosímetro Rotacional para distintas temperaturas, se aprecia un incremento de las viscosidades en los asfaltos modificados con respecto a los asfaltos CA20 y CA30, como se presenta en la Figura 12. Para los ligantes AM3, CA20+3%SB y CA20+3%B no se ha determinado la viscosidad a 60°C con esta metodología de ensayo debido a su elevada

viscosidad y su comportamiento reológico, como se puede constatar más adelante en las curvas de flujo que se indican en este trabajo. Este incremento de viscosidad de los asfaltos modificados traerá como consecuencia un aumento de las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas que con ellos se elaboren respecto a las preparadas con el ligante convencional CA20.

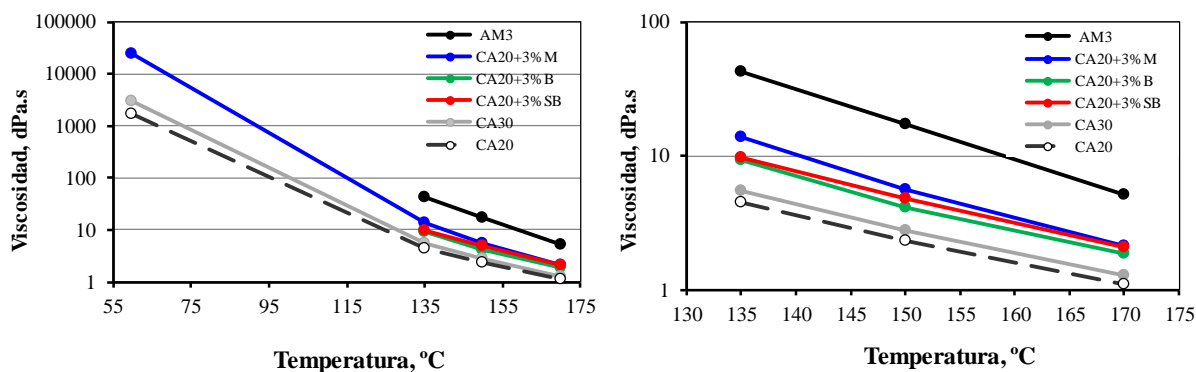


Figura 12. Perfiles de Viscosidades

### 5.3.3 Recuperación elástica torsional

El análisis de la Recuperación elástica torsional indica que el agregado de los diferentes plásticos reciclados proporciona propiedades elásticas al ligante, del orden del 20-30% de la recuperación elástica del ligante AM3 como se muestra en la Figura 13. En el caso del CA20+3%M es mayor dado que se incorpora más fácilmente al ligante base debido a su tamaño.

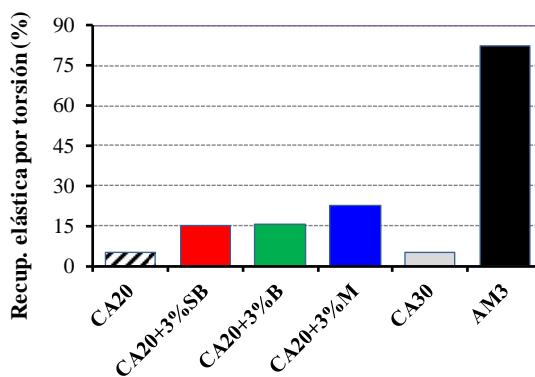


Figura 13. Recuperación Elástica por Torsión

### 5.3.4 Ensayo DSR

El Módulo complejo ( $G^*$ ), definido como el cociente entre el torque máximo aplicado y la deformación máxima experimentada obtenidos por medio del ensayo en el Reómetro de Corte Dinámico, DSR (Dynamic Shear Rehometer), es determinado a una temperatura de 60°C obteniéndose los valores de módulo complejo y ángulo de desfase  $\delta$  entre los picos de la carga sinusoidal aplicada y la deformación

resultante. La Figura 14 muestra a la izquierda, los valores de  $G^*$  medidos a 60 °C en tanto que a la derecha de la misma figura se muestran los valores del ángulo  $\delta$ .

Se observa que los asfaltos con adición de plásticos incrementan su rigidez (aumenta  $G^*$ ) y mejoran sus propiedades elásticas con una disminución del ángulo de desfasaje  $\delta$ . Entonces es posible calcular las relaciones  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  y  $G^*/\text{sen} \delta$  a 60°C como se muestran en la Figura 15.

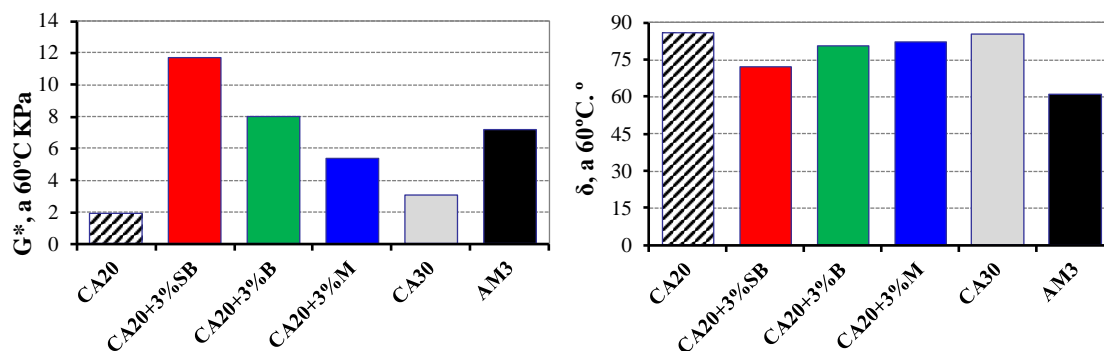


Figura 14. Valores de  $G^*$  y  $\delta$  para los asfaltos analizados

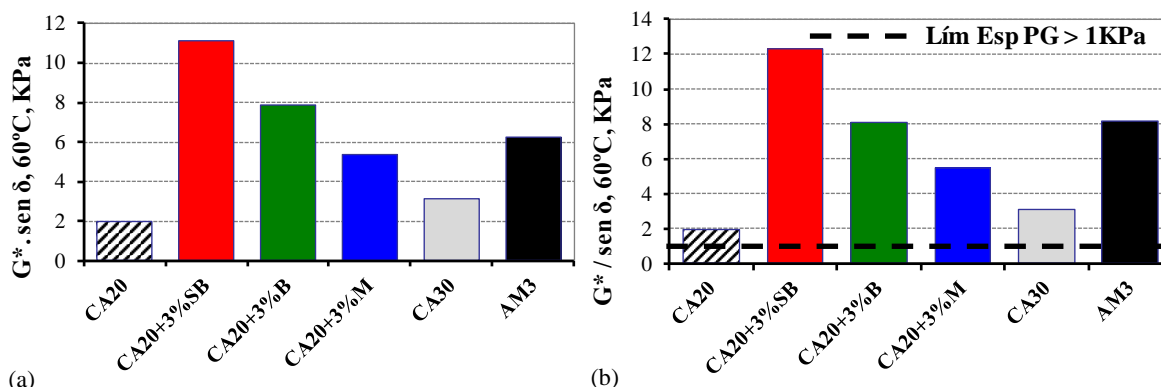


Figura 15. Valores de  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  (a) y  $G^*/\text{sen} \delta$  (b) para los asfaltos analizados

De acuerdo a las especificaciones basadas en el Grado de Performance PG [16], el valor de  $G^*/\text{sen} \delta$  debe ser mayor a 1 KPa para que el desempeño de un asfalto virgen sea apropiado frente a la acumulación de deformaciones permanentes. Se observa en la Figura 15 que todos los ligantes cumplen con este límite y que esta relación es mayor en los asfaltos modificados. Esto indicaría una mejora en el aporte del ligante en cuanto a la resistencia al ahuellamiento, aunque algunos autores sugieren que el  $G^*/\text{sen} \delta$  subestima el comportamiento de algunos asfaltos, sobre todo aquellos con elasticidad retardada elevada como, por ejemplo, asfaltos modificados con polímero del tipo SBS.

Adicionalmente se evaluó, en el Reómetro de Corte Dinámico DSR a 60°C, la viscosidad de todos los ligantes pudiéndose trazar las Curvas de Flujo. En la Figura 16 se observa como varía este parámetro con la velocidad de corte, donde se evidencia un comportamiento del tipo newtoniano en el asfalto CA30 y CA20+3%SB, en el caso de los asfaltos CA20 y CA20+3%M la viscosidad presenta muy pequeñas variaciones con la velocidad de corte, para el AM3 la viscosidad del ligante depende de la velocidad de corte, evidenciando su comportamiento no newtoniano. Este

efecto es mucho más notorio en el ligante CA20+3%B donde sus curvas se alejan de la linealidad y del comportamiento newtoniano.

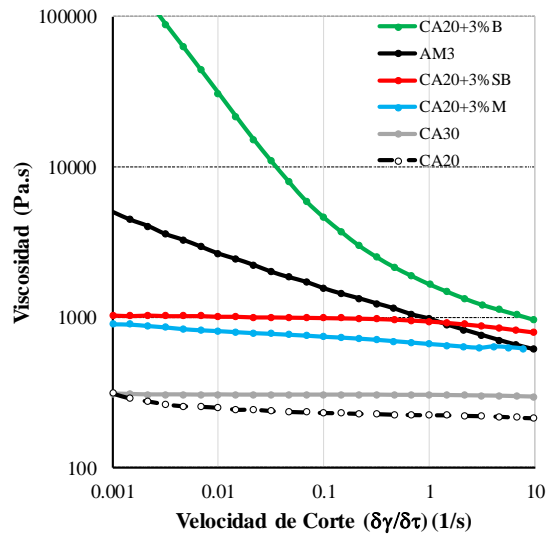


Figura 16. Curvas de Flujo a 60°C

### 5.3.5 Ensayo MSCR

Finalmente se realizaron ensayos de Creep a Múltiples Tensiones y Recuperación (Multiple Stress Creep & Recovery, MSCR Test por su designación en inglés) utilizando el Reómetro de Corte Dinámico. En este ensayo, una tensión de corte  $\tau$  es aplicada durante 1 segundo a un delgado disco de asfalto mediante el equipo DSR y luego retirada con 9 segundos de recuperación. Esta tensión se aplica reiteradamente para 10 ciclos y se miden las deformaciones resultantes tanto en los períodos de carga como en los de descarga como se muestra en la Figura 17 para los dos primeros ciclos aplicados. El proceso se repite para distintos valores crecientes de la tensión de corte aplicada.

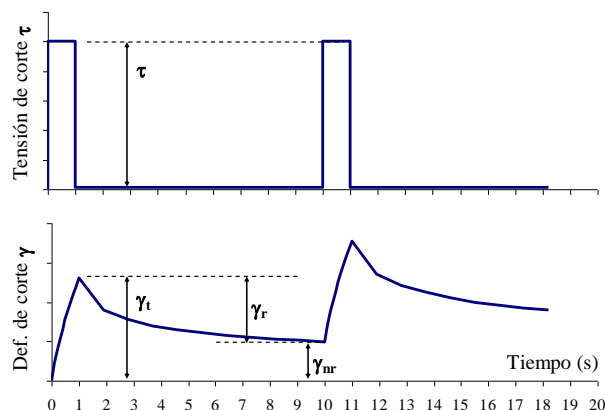


Figura 17. Esquema de tensiones y deformaciones en el ensayo MSCR

Se calculan entonces la Compliance no recuperable  $J_{nr}$  (1) y el porcentaje de recuperación %R (2) como:



$$J_{nr} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{\gamma_{nr}}{\tau} \quad (1)$$

$$\%R = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{\gamma_r}{\gamma_t} \times 100 \quad (2)$$

siendo  $\gamma_{nr}$  la deformación no recuperable,  $\gamma_r$  la deformación recuperable,  $\gamma_t$  la deformación total y  $\tau$  la tensión de corte [17]. Esa Compliance no recuperable  $J_{nr}$  puede entenderse como la deformación no recuperable para una tensión unitaria.

Bahia et al. [18] han mostrado que los resultados del ensayo MSCR correlacionan promisoriamente con el desempeño de las mezclas asfálticas frente a la falla del ahuellamiento y que el mismo es adecuado para evaluar el efecto de los asfaltos modificados y estimar su rol en el desarrollo de esas deformaciones permanentes.

A modo comparativo, se han realizado ensayos MSCR sobre todas las muestras de acuerdo a la norma ASTM D7405:2010 y a una temperatura de 60°C. La Figura 18 muestra que los distintos asfaltos con incorporación de plásticos reciclados presentan un mejor comportamiento respecto a los convencionales, aunque con menores prestaciones que el asfalto tipo AM3. El comportamiento del asfalto CA20+3%SB es el que más se aproxima al modificado comercial AM3. La Tabla 5 presenta un resumen de los resultados de este ensayo para todos los ligantes analizados a 60 °C y con el objeto de comparar los comportamientos observados a esa única temperatura. Para ambos niveles de tensión aplicada, la recuperación elástica aumenta y disminuye la deformación no recuperable para los ligantes modificados con plástico.

En el caso de la aplicación del bajo nivel de tensión (100 Pa) se consiguen moderados efectos elásticos con significativos porcentajes de recuperación elástica y menores valores de  $J_{nr}$  que en algunos casos se comparan con los obtenidos para el asfalto modificado AM3 aunque estos efectos no son tan notables para el caso de la alta tensión aplicada (3200 Pa). Sin embargo, de una manera general y para los dos niveles de tensión aplicada en este ensayo, la adición de los plásticos produce una rigidización de los ligantes respecto a los asfaltos convencionales lo que extrapolado luego a las mezclas asfálticas, debiera corresponder con una menor susceptibilidad a la deformación permanente.

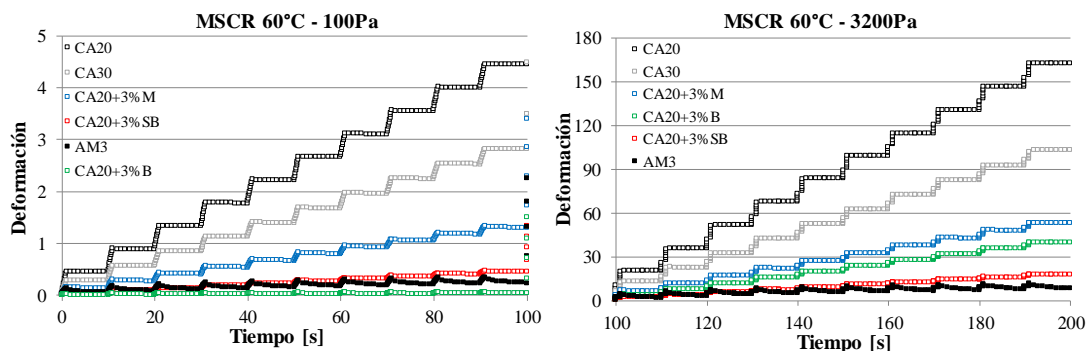


Figura 18. Resultados MSCR a 60°C

Tabla 5. Respuesta de los ligantes a 60 °C

Material	Respuesta elástica		Deformación no recuperable	
	%R (100Pa)	%R (3200Pa)	J <sub>nr</sub> 100Pa (1/KPa)	J <sub>nr</sub> 3200Pa (1/KPa)
CA20	2.10	0.00	4.45	4.96
CA30	4.1	0.00	2.81	3.13
AM3	81.5	80.5	0.24	0.25
CA20+3%M	18.9	4.4	1.30	1.63
CA20+3%SB	24.5	12.7	0.45	0.54
CA20+3%B	88.2	0.7	0.04	1.25

#### 5.4 Ensayos sobre mezclas asfálticas colocadas

De cada uno de los tramos ejecutados se tomó mezcla asfáltica del camión, en la planta, y se llevó a laboratorio para su caracterización física y mecánica, los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Ensayos sobre las mezclas asfálticas

Ensayos	CAC-CA20 SBVS	CAC-CA20 SBVH	CAC- CA20 BVS	CAC-CA20 BVH	CAC-CA30
Densidad [Kg/dm <sup>3</sup> ]	2.325	2.447	2.300	2.426	2.414
Dens Teór Máx [Kg/dm <sup>3</sup> ]	2.443	2.540	2.465	2.557	2.562
Vacios [%]	4.8	3.7	6.7	5.1	5.8
VAM [%]	16.4	15.9	18.2	17.2	17.9
RBV [%]	70.8	77.0	63.4	70.4	67.7
Estabilidad [KN]	17.4	12.3	20.5	13.2	12.2
Fluencia [mm]	5.04	4.88	6.59	4.28	3.9
E / F [KN/mm]	3.5	2.5	3.1	3.1	3.1
Resist. Conservada [%]	93.0	99.0	85.0	72.0	59
WTS <sub>aire</sub> [mm/10 <sup>3</sup> ciclos]	0.016	0.035	0.014	0.026	0.054
PR <sub>aire</sub> a 10000 ciclos [%]	1.58	3.31	3.79	2.25	3.44

Se cumplen las especificaciones volumétricas para mezclas asfálticas en Argentina salvo en la mezcla CAC-CA20+BVS que supera el 5% de vacíos. Las estabildades Marshall y la resistencia conservada aumentan en todas las mezclas. Los valores de la relación estabilidad-fluencia son similares para todas las mezclas. Se calcula el Índice de Resistencia Conservada (IRC) del grupo húmedo respecto del seco en función de los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI) a una temperatura de 25°C y a una velocidad constante de deformación vertical de 50 mm/min, la especificación usada en Argentina exige un valor del IRC mínimo del 80%. La incorporación de plástico en todos los casos mejora este valor.

En la Figura 19 (izq) se muestran las curvas maestras del módulo dinámico para las mezclas modificadas, se evidencia que las curvas con SB son menos rígidas que las que tienen B, además las mezclas modificadas por vía seca son paralelas entre sí al igual que las confeccionadas con asfaltos modificados por vía húmeda. En la

Figura 19 (der) se muestran los resultados del ensayo WTT con una marcada reducción del ahuellamiento en todas las mezclas con plásticos. Todas ellas cumplen con las especificaciones nacionales respecto a la deformación permanente de mezclas asfálticas incluso la mezcla patrón.

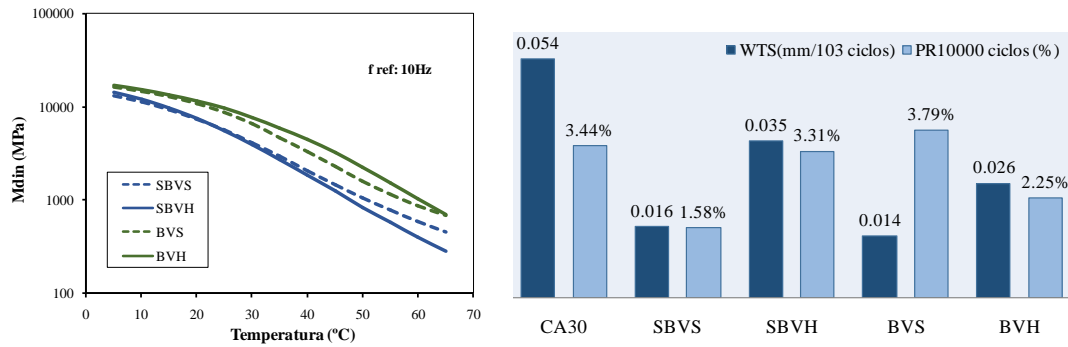


Figura 19. Curvas maestras del Módulo dinámico y ensayo de rueda cargada

### 5.5 Evaluaciones en el tramo

Posteriormente a la construcción del tramo se realizan auscultaciones en forma sistemática del ahuellamiento con regla de 3m, textura (parche de arena), y calado de testigos para control de densidades y espesores. Los resultados se observan en la Figura 20 y la Tabla 7. El ahuellamiento se mide durante 22 meses y la textura sólo durante 10 meses. Se bachearon los tramos realizados por vía seca, al final de cada tramo, a los 8 meses, luego debieron ser fresados a los 14 meses ya que presentaban desprendimientos en algunos sectores. Los tramos ejecutados por vía húmeda se encuentran en buenas condiciones de servicio. (Figura 21).

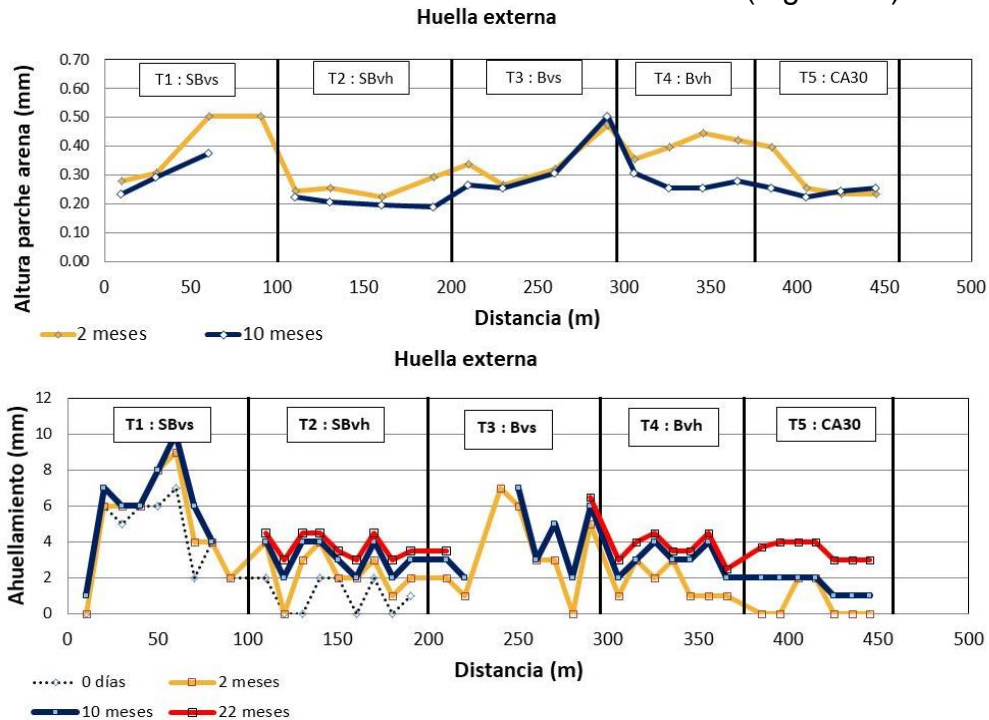


Figura 20. Evolución del ahuellamiento y la macrotextura



Figura 21. Estado de los tramos a los 22 meses

## 6 Agradecimientos

Es necesario agradecer la excelente predisposición y colaboración de todo el personal de la UNR, de YPF, de ACA, del Corredor Vial N°4 y de la Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe. Además de los aportes económicos que efectuaron cada una de las instituciones mencionadas para poder concretar esta etapa del Proyecto PASOS.

## 7 Conclusiones

### Sobre el asfalto modificado con polietileno

Se ha podido llevar a cabo la dispersión del polietileno reciclado sin mayores dificultades operativas para la modificación del asfalto por vía húmeda en el molino de la planta: agitado de 2 a 3 hs para el PEBD y de 3 a 4 hs para el PEAD.

Han mostrado un cambio significativo en sus propiedades reológicas respecto al asfalto base. La Penetración y el Punto de Ablandamiento varían notablemente observándose que la Penetración disminuye y el Punto de Ablandamiento aumenta.

Muestran una componente elástica significativa cuando es valorada a través del ensayo de recuperación elástica. De igual manera, los resultados obtenidos mediante el Reómetro de Corte Dinámico muestran que incrementan su rigidez (aumenta  $G^*$ ) y mejoran sus propiedades elásticas con una disminución del ángulo de desfasaje  $\delta$ .

El parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  evaluado a una misma temperatura, en este caso  $60^\circ\text{C}$ , se aumenta al incorporar residuos plásticos al asfalto base, indicando un aumento en el aporte del ligante en cuanto a la resistencia a las deformaciones permanentes.

La viscosidad de los mismos también aumenta con el agregado de plástico para todas las temperaturas consideradas.

El ensayo MSCR muestra que la recuperación elástica aumenta para ambos niveles de tensión aplicada y simultáneamente, disminuye la deformación no recuperable.

### Sobre las mezclas

Las mezclas obtenidas presentan buenos resultados en ensayos de laboratorio mientras que in situ se aprecia un contenido de vacíos más elevado: 7 a 12 %, lo que implica la necesidad del uso de equipos más pesados para compactar.

### Sobre el tramo y el proyecto PASOS

Se realizó la primera experiencia in situ en Argentina utilizando mezclas asfálticas en caliente con la incorporación de plásticos reciclados.

Se estableció una transferencia concreta de conocimientos y acciones conjuntas entre la UNR, YPF, ACA y la Unidad Ejecutora Corredor Vial N°4 de la RP18.

Se construyeron cuatro tramos de aproximadamente 100 m de longitud cada uno. Se incorporó plástico reciclado en forma de pellets de Silos Bolsas y Bidones en 2% por vía seca respecto al peso total de la mezcla y 3% respecto al porcentaje de asfalto y un quinto tramo de control con asfalto CA30. De la experiencia constructiva se destaca que el uso de este tipo de mezcla requiere mejores cuidados del manejo de las temperaturas respecto a una convencional. Se recalca la necesidad de no sobrecalentar la mezcla, y que no se produzcan pérdidas de temperatura durante el traslado y colocación, previamente al proceso de compactación. El enfriamiento de la mezcla por debajo de 140°C durante la compactación impide una buena terminación superficial y genera un exceso de vacíos. En este sentido hubiera sido más conveniente trabajar con espesores mayores a los 50 mm y que se empleara como capa de base y no de rodamiento.

Se comenzó con el seguimiento de la evolución en el tiempo de las características superficiales: macrotextura, deformación superficial, ahuellamiento, y densidad de las mezclas colocadas.

Los tramos construidos con plásticos incorporados por vía seca sufrieron desprendimientos al cabo de los 14 meses de servicio, los tramos construidos con plásticos por vía húmeda al cabo de 22 meses están en servicio, sin deterioros visibles. Las fisuras que se observan son producto del ensanche previo y fisuras pre-existentes.

#### Acciones Futuras

Estudio del análisis a la estabilidad al almacenaje del asfalto modificado, dado que para su empleo en el presente proyecto se utilizó en el mismo momento que se elaboró, debido justamente a la pérdida de su condición de dispersión si se discontinuaba con el proceso de agitación y mezclado en el molino.

Optimizar una mezcla asfáltica modificada con propiedades mejoradas y llevar a cabo otras aplicaciones a escala real.

## **8 Referencias**

- [1] Huang Y, Bird R N, Heidrich O. (2007) A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling* 52 58–73.
- [2] Hınıslıoglu S, Agar E. (2004) Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters* 58 267– 271.
- [3] Attaelmanan, M., Feng, C. P, Al-Hadidy, A. (2011) Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials* 25 2764–2770.
- [4] Zoorob, S. and Suparna, L.B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement & Concrete Composites* 22 233-242.
- [5] Cauhapé Casaux, M., Angelone S., Borghi M.y Martínez F. (2012). Reuse of waste polyethylene from Silo bags in asphalt mixtures. ISAP 2012, 2nd Int. Symp. on Asphalt Pavements and Environment. Brasil.
- [6] Angelone s, F. Martínez, M. C. Casaux. (2016) A comparative study of bituminous mixtures with recycled polyethylene added by dry and wet processes, 8th RILEM Int.Symp. on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, Italia. Series Title: RILEM Bookseries, Vol. 11, eBook ISBN 978-94-017-7342-3, DOI 10.1007/978-94-017-7342-3.

- [7] Angelone S., Martínez F. Cauhapé Casaux M., Balige M. y Berardo A. (2015) Alternativas sustentables en la producción de asfaltos: Modificación con polvo de polietileno reciclado. XVIII CILA. Argentina. ISSN 978-950-630-031-9 e-book.
- [8] Fan Yin et al. (2020) Performance Evaluation and Chemical Characterization of Asphalt Binders and Mixtures Containing Recycled Polyethylene, National Center for Asphalt Technology & Western Research Institute. <http://www.tavoil.com/wp-content/uploads/2020/06/PLASTICS-NEMO-Film-Phase-III-Final-Report-03102020-1.pdf>
- [9] <http://www.ceamse.gov.ar/wp-content/uploads/2017/10/I.Final-ECRSU-CABA-FIUBA-2015-NOV-16.pdf>
- [10] [http://www.acacoop.com.ar/planta\\_de\\_recupero.html](http://www.acacoop.com.ar/planta_de_recupero.html). (2018)
- [11] Angelone S., Casaux, M. y Martinez F. (2013) Waste Recycling: introducing an alternative of use of plastics from municipal solid waste and rural waste in asphalt pavements. WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. ISSN 2183-0568 2nd International Conference. Portugal.
- [12] Angelone S., Cauhapé Casaux M., Borghi M. y Martínez F. (2013) Green Pavements: Reuse of plastic waste in asphalt mixtures". Revista Materials and Structures. ISSN 1359-5997 -DOI 10.1617/s11527-015-0602-x.
- [13] Cauhapé Casaux, M., Angelone S. y Martinez F. (2015) Pavimentos más sustentables: Influencia en el comportamiento a la deformación permanente de mezclas asfálticas por la incorporación de plásticos reciclados. 10º Congreso de la Vialidad Uruguaya. AUC. Montevideo, Uruguay.
- [14] Angelone S., Martínez F. Cauhapé Casaux M, Balige M. y Berardo A. (2016) Seguridad y Sustentabilidad en la construcción de carreteras. Estudio del empleo de plásticos reciclados para la reducción del ahuellamiento en mezclas asfálticas. XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito - XXXVIII Reunión del Asfalto. Rosario, Argentina.
- [15] Angelone S., Martínez F. Cauhape Casaux M., Balige M. y Berardo A. (2015) Alternativas sustentables en la producción de asfaltos: Modificación con polvo de polietileno reciclado. XVIII CILA. Argentina. ISSN 978-950-630-031-9 e-book.
- [16] Cauhape Casaux, M., Angelone S., Borghi M.y Martínez F. (2012).Reuse of waste polyethylene from Silo bags" in asphalt mixtures. ISAP 2012, 2nd Int. Symp. on Asphalt Pavements and Environment. Brasil.
- [17] D'Angelo, J., R. Klutz, R. Dongre, K. Stephens and L. Zanzotto. (2007) "Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test", Asphalt Paving Technology, Vol. 76, No.123.
- [18] Bahia H., Tabatabaee N., Clopotel C. and Golalipour A. (2011) "Evaluation of Using the MSCR test for Modified Binder Specification", 56th. Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association.