

## **Seguridad y Sustentabilidad en la construcción de carreteras. Estudio del empleo de plásticos reciclados para la reducción del ahuellamiento en mezclas asfálticas.**

Cauhapé Casaux, M.<sup>1</sup>, Martínez F. <sup>1</sup>., Angelone, S.<sup>1</sup> Balige, M. <sup>2</sup>, y Berardo, A.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Laboratorio Vial IMAE-FCEIA-Universidad Nacional de Rosario-Argentina. Riobamba y Berutti. Rosario (2000). Tel: 0341 – 4808538 int 136. Correo electrónico: [mccasaux@fceia.unr.edu.ar](mailto:mccasaux@fceia.unr.edu.ar), [sangelon@fceia.unr.edu.ar](mailto:sangelon@fceia.unr.edu.ar), [fermar@fceia.unr.edu.ar](mailto:fermar@fceia.unr.edu.ar).

<sup>2</sup> YPF - Servicio Técnico Especialidades – Asfaltos. Ciudad de Buenos Aires - Argentina [especialidades@ypf.com](mailto:especialidades@ypf.com)

### **RESUMEN**

Actualmente, los proyectos de Ingeniería incorporan a la Sustentabilidad como un parámetro prioritario. En particular, la disposición de residuos es un tema de preocupación mundial, por su gran volumen y diversidad, resultado del desarrollo tecnológico y el alto crecimiento demográfico. Una alternativa sostenible para su gestión es el reciclado y revalorización, puesto que permite obtener importantes ahorros de materiales y energía y un aumento sustancial del volumen global de residuos dispuestos responsablemente.

Por otra parte, el incremento notable del número de vehículos pesados que circulan sobre los caminos y las magnitudes de las cargas transportadas, han conducido en muchos casos al deterioro prematuro de estas vías de comunicación. Uno de los tipos de falla asociado más frecuente es el ahuellamiento. Éste compromete el confort y la seguridad de los conductores, particularmente en días de lluvia por el fenómeno de hidroplaneo.

Buscando soluciones tecnológicas que contribuyan a atender ambas problemáticas señaladas, se ha considerado a los caminos como una alternativa potencialmente viable para reutilizar, reciclar y revalorizar a estos residuos plásticos con una importante contribución a la conservación y mejora del medio ambiente.

Basándose en estas pautas se plantea el estudio de ocho mezclas: dos de control (CA30 y AM3), cuatro elaboradas con asfalto CA30 + residuos plásticos (silo bolsa en escamas y en pellets, Polietileno (film) micronizado y en pellets) y dos con asfalto CA20 + residuos plásticos (Polietileno micronizado y en pellets). Todos los plásticos reciclados son incorporados directamente a la mezcla asfáltica “por vía seca”.

Se realizan ensayos de caracterización físico-mecánica y un análisis comparativo de las distintas mezclas.

Los resultados indican, principalmente, reducción de susceptibilidad térmica y mejora del comportamiento frente a la deformación permanente para las mezclas con incorporación de plásticos reciclados, resultando en una alternativa ambientalmente amigable y una disposición ventajosa de estos residuos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. El problema del ahuellamiento en el diseño de mezclas asfálticas.**

Para poder diseñar y proyectar una estructura de pavimento flexible resulta imprescindible poder caracterizar cada uno de los materiales que la componen. Esta caracterización se enfoca tanto al aspecto físico como el mecánico. Para poder dimensionar cada una de las capas y predecir su vida útil resulta de gran importancia poder saber a priori que comportamiento va a presentar frente a las cargas dinámicas que actuarán, las distintas condiciones de carga que se produzcan y los factores de servicio.

El ahuellamiento es una de las fallas más frecuentes que se produce en los pavimentos, se genera a partir de la acumulación de las deformaciones permanentes de todas las capas componentes de la estructura del camino. Sin embargo, debido a su importancia relativa y

su importante costo, el estudio y verificación de este fenómeno se ha enfocado sobre las mezclas asfálticas destinadas a las capas superiores de los pavimentos.

El ensayo conocido como “Ensayo de Rueda Cargada” (ERC) o “Wheel Tracking Test” (WTT) es uno de los ensayos más difundidos internacionalmente para diseñar las mezclas asfálticas en este aspecto, que si bien no permite predecir el ahuellamiento ni es el que más se ajusta a los desarrollos teóricos, como lo son por ejemplo el ensayo de Creep Dinámico (DLC) o el Simple Performance Test (SPT), es una buena herramienta para establecer el comportamiento de diferentes mezclas y caracterizar comparativamente su aptitud ante el ahuellamiento tal como se expresa en Angelone et al [1].

En el Laboratorio Vial del IMAE se diseñó, desarrolló y puso a punto, durante el año 2005, un prototipo del equipo de ensayo del tipo ERC o WTT, el cual se muestra en la Figura 1. Los detalles se encuentran publicados por Angelone et al [2,3,4]. El equipo dispone de la versatilidad suficiente para poder realizar los ensayos conforme a la norma BS EN 12697-22:2003: Bituminous Mixtures for Hot Mix Asphalt. Part 22. Wheel Tracking Test- Procedimiento B, para probetas pequeñas, [5].

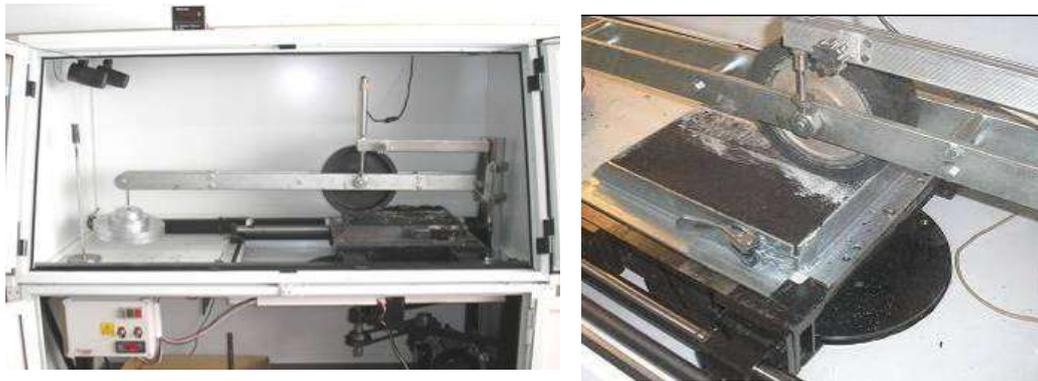


Figura 1: Equipo de WTT desarrollado en el IMAE

## 1.2. El problema de los residuos

Los desechos pueden ser clasificados según sea su origen en urbanos domésticos, industriales y mineros. Actualmente, el manejo de estos residuos constituye un serio problema para el medio ambiente, debido a su gran volumen y diversidad. Surgen como consecuencia del enorme desarrollo tecnológico producido en las últimas décadas y el alto crecimiento demográfico. Esta situación ha motivado que desde diversos ámbitos se estén realizando actividades que permitan solucionar, aunque sea parcialmente, este gran problema.

La gestión integral de residuos sólidos (GIRS) debe considerarse una disciplina asociada a la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y/o transporte y disposición final de los residuos sólidos, para su correcto control, y en armonía con principios económicos, de higiene y salud pública, de ingeniería y de las correspondientes consideraciones ambientales para responder adecuadamente a las expectativas públicas, utilizando las tecnologías más compatibles con la realidad local. Actualmente, la GIRS presenta problemáticas que, proyectadas a futuro, requieren la toma de acciones en el corto plazo. La cantidad de residuos sólidos generados y recolectados son de una importancia crítica para determinar el cumplimiento de los programas de gestión. La unidad de expresión más común utilizada para la tasa de generación de residuos es la denominada generación per cápita diaria (GPCD), cuyas unidades son el kg/hab x día. La GPCD puede considerarse

como un número fijo promedio para proyectar la generación futura. En la Argentina, valores estimados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) indicaron un valor promedio de la GPCD de 1.15 kg/hab x día (2010), sin embargo este valor no es constante en todo el territorio registrándose en las grandes ciudades valores de 1.41 kg/hab x día, en ciudades medianas 1.06 kg/hab x día y en ciudades pequeñas 0.92 kg/hab x día. Cabe destacar que las cifras encontradas son muy similares a las de otros países de América Latina y el Caribe. [6, 7].

A continuación se presentan algunas cifras obtenidas de estudios realizados sobre residuos sólidos urbanos en Argentina, a nivel nacional y para la ciudad Autónoma de Buenos Aires y Rosario.

En la Figura 2 se muestra la composición y disposición final de residuos sólidos urbanos en Argentina (2010). En ellas se observa que respecto a la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU), los residuos plásticos representan aproximadamente un 15 % del total. Son materiales difícilmente biodegradables que ocupan importantes volúmenes de vertederos. En cuanto a la disposición final de los RSU se observa que más del 25% de los residuos son depositados en vertederos o quemados a cielo abierto, esto genera una situación muy problemática que requiere de la implementación de políticas urgentes para mitigarla.

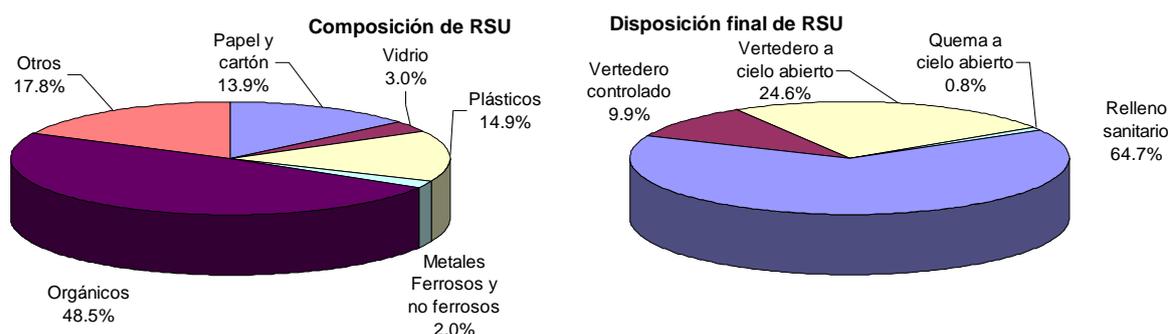


Figura 2: Composición y disposición final de residuos sólidos urbanos en Argentina [7,8]

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) se llevan a cabo desde hace varios años estudios de calidad de los residuos sólidos urbanos. En particular, respecto a los residuos plásticos indican que son los que presentan el mayor crecimiento: desde la década del '80 su proporción respecto al total de residuos generados aumentó en forma exponencial desde porcentajes prácticamente despreciables hasta alcanzar un valor de 18,5% en el año 2011. Su volumen fue variando desde 280 ton/día (1991) hasta 560 ton/día (2011). De este valor actual, aproximadamente entre el 55% y 75% serían materiales potencialmente reciclables (PET + PEAD + PEBD). En la Figura 3 se presenta la composición física promedio de los residuos sólidos urbanos y el análisis de los subcomponentes de los residuos plásticos en la CABA. [9]

Complementariamente, según estadísticas de la Municipalidad de Rosario, en la ciudad, los residuos sólidos urbanos se componen de: 50% de orgánicos y 50% de inorgánicos no degradables en el corto plazo, dentro de los cuales los plásticos representan un 60% del volumen total y un 30% del peso global. [10]

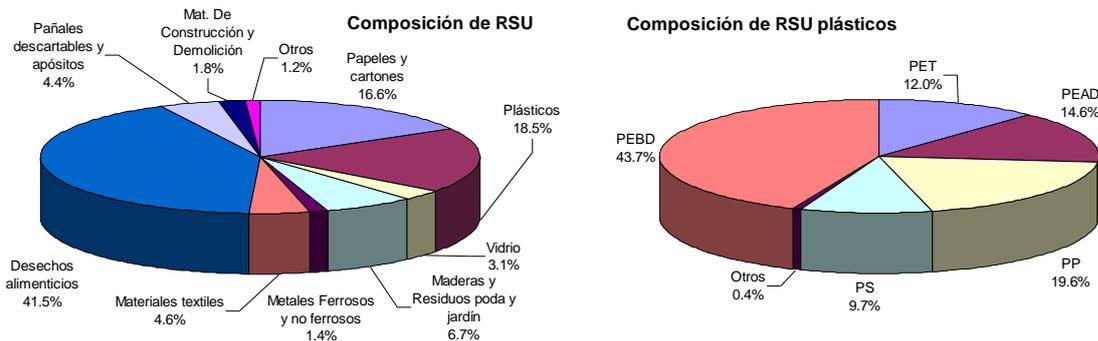


Figura 3: Composición de los RSU y componentes de residuos plásticos en CABA

Referencias:

- PEBD: Polietileno de baja densidad
- PET: Polietileno tereftalato
- PEAD: Polietileno de baja densidad
- PP: Polipropileno
- PS: Poliestireno

1.3. Empleo de residuos plásticos reciclados en la elaboración de mezclas asfálticas

En la actualidad, la mitigación de los problemas medioambientales generados a partir de la disposición final de los residuos, el cuidado del medioambiente y el concepto de desarrollo sostenible constituyen parámetros de gran relevancia en proyectos de cualquier índole, incluida la producción de mezclas asfálticas más sustentables.

Los residuos plásticos presentan un interés particular respecto a su incorporación a las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de caminos. Por un lado, la compatibilidad físico-química y su producción derivada de la industria petroquímica, y por otro, el gran volumen de materiales consumidos en la construcción de caminos. Además, los incrementos de solicitaciones actuantes sobre el pavimento debido al aumento de las cargas transportadas y de los volúmenes de tránsito demandan materiales de mayores y mejores prestaciones.

Basándose en estas premisas, numerosas investigaciones se han llevado a cabo en los últimos años, tanto en nuestros laboratorios como a nivel mundial. Las mismas fueron realizadas a partir de la aplicación de dos metodologías de producción diferentes: la denominada “incorporación por vía húmeda”, donde el material elegido se incorpora directamente al ligante asfáltico en caliente (como modificador del mismo) y la “incorporación por vía seca”, en la que el material elegido se incorpora a la mezcla asfáltica de la misma manera que se incorpora un agregado o fibra. La mayoría de las experiencias realizadas a nivel mundial respecto a la incorporación de diferentes productos o aditivos se han efectuado sobre ligantes asfálticos, siendo menor el número de experiencias realizadas sobre mezclas asfálticas. Los resultados encontrados indican en general que las mezclas obtenidas (tanto por incorporación en seco como en húmedo) presentan un mejoramiento del comportamiento mecánico, fundamentalmente, frente a las deformaciones permanentes.[11,12,13,14]

En particular, en el grupo de investigación del Laboratorio Vial del IMAE-FCEIA-UNR, se han llevado a cabo proyectos de investigación relacionados a esta modalidad empleando cenizas volantes en mezclas asfálticas, caucho reciclado de neumáticos descartados en

asfaltos y mezclas asfálticas y polietileno reciclado en mezclas asfálticas, [15, 16, 17].

En este trabajo se estudia la factibilidad de emplear plásticos provenientes de residuos urbanos y rurales en mezclas asfálticas mediante la incorporación por vía seca de los mismos con el objeto de evaluar los cambios que éstos producen en el comportamiento físico-mecánico de las mismas. Se considera la utilización de polietileno (PE) proveniente de film de envoltura y silos bolsa.

## 2. MODULO DINÁMICO

El módulo de deformación o módulo dinámico es uno de los parámetros de caracterización que mayor interés presenta por su significación en los procesos de diseño estructural de los pavimentos flexibles. Mediante el mismo puede determinarse la distribución de tensiones y deformaciones en todas las capas componentes de la estructura vial y por lo tanto permite relacionarlo estrechamente con la valoración del deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes. También se ha propuesto su utilización como un ensayo de valoración del comportamiento, volviéndolo de utilidad para la dosificación, el control de calidad y el análisis de la influencia de distintos factores de formulación de la mezcla.

El Módulo es determinado en laboratorio mediante diferentes procedimientos experimentales. Los más difundidos son: el ensayo de compresión dinámica (ASTM D3497 - 79(2003): Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, [18], y AASHTO TP62: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt, [19]) y el ensayo de tracción indirecta con cargas repetidas (ASTM 4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus for bituminous Mixtures [20]), entre otros. Este último ensayo, presenta una metodología experimental que tiene numerosas ventajas en su implementación práctica, fundamentalmente la obtención de testigos o elaboración de las muestras de ensayo.

En particular para este trabajo se siguió un protocolo de ensayos desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE con aplicación de cargas sinusoidales a distintas frecuencias y temperaturas [21]. Los resultados obtenidos son presentados en forma de curvas maestras trazadas a partir de la aplicación del principio de equivalencia frecuencia-temperatura para los materiales viscoelásticos para una dada temperatura de referencia elegida arbitrariamente. En particular, en el Laboratorio Vial del IMAE se propone la utilización de un modelo sigmoideal para representar estas curvas, respetando el comportamiento físico observado en este tipo de materiales. El modelo sigmoideal generalizado (en forma de "S" apaisada), es de la forma Ec. (1):

$$\log E_d = (\log E_{\min}) + \frac{\log E_{\max} - \log E_{\min}}{S} \quad (1)$$

Donde:

$$S = 1 + e^{(\beta + \log f_R \cdot \delta)} \quad (2)$$

$$f_R = f \cdot e^{\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}} \right)} \quad (3)$$

$E_d$  : módulo dinámico de la mezcla (MPa)

$E_{\min}$  : valor mínimo del modelo (MPa)

$E_{\max}$  : valor máximo del modelo (MPa)

$\delta$  y  $\beta$  : parámetros de ajuste del modelos

$f$  : frecuencia (Hz)

$\Delta H$  : Energía de Activación (KJ/mol)

R : Constante Universal del gas perfecto  
T : Temperatura (°Kelvin)  
 $T_{REF}$  : Temperatura de Referencia (°Kelvin)

Los parámetros  $\delta$  y  $\beta$  están relacionados a la curvatura, la pendiente y la localización del punto de inflexión de la función sigmoïdal como se muestra en la Figura 4.

El parámetro  $E_{m\acute{a}x}$  es un valor asintótico al que tiende la función para frecuencias muy elevadas. Por el contrario,  $E_{m\acute{i}n}$  es el valor asintótico al que tiende la función para frecuencias muy bajas (cuasi-estáticas) [20].

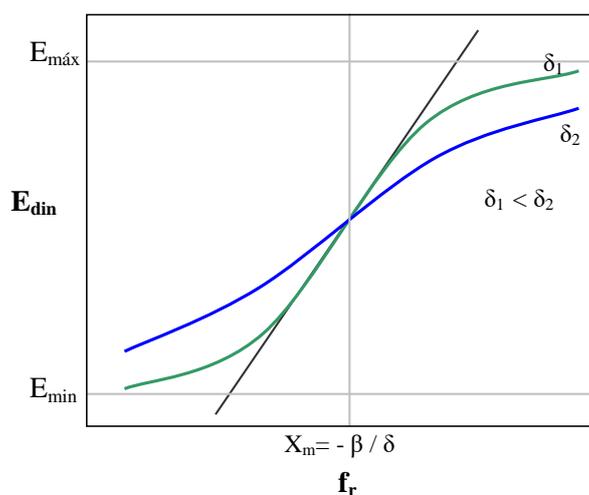


Figura 4: Modelo sigmoïdal generalizado

### 3. ENSAYO DE RUEDA CARGADA

Actualmente, existen diversos ensayos de laboratorio que permiten caracterizar un material desde el punto de vista de su deformabilidad. En ellos se trata de reproducir lo mejor posible las condiciones de sollicitaciones in situ mediante la adopción de distintas posibilidades de ensayo de las muestras, donde se aplican diferentes estados de tensiones, temperatura, humedad, etc. Los ensayos de rueda cargada se encuentran dentro de los denominados “ensayos de simulación”. Para alcanzar una validación correcta entre lo que sucede en laboratorio e in situ, el ensayo debe reproducir las condiciones de tensiones que se desarrollan dentro del pavimento y para un rango de temperaturas amplio que permita abarcar condiciones desfavorables del orden de los 60°C. El procedimiento general de ensayo consiste en medir la deformación vertical (Profundidad de huella) que se produce en un espécimen de mezcla asfáltica, debido a la aplicación de una carga dinámica, mediante una rueda cargada que se desplaza sobre la probeta (Figura 1). Una de las normas existentes para la realización del ensayo es la EN 12697-22:2003+A1:2007: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking (Comunidad Europea, 2004). [5]

En particular, como se menciona en la Introducción, en el laboratorio Vial IMAE, para evaluar el comportamiento de las mezclas frente a las deformaciones permanentes se lleva a cabo el ensayo de rueda cargada, WTT, aplicando el protocolo establecido en dicha norma correspondiente al Procedimiento B para probetas pequeñas.

Se define la Profundidad de ahuellamiento proporcional,  $PR_{aire}$ , como la profundidad de la huella,  $H_i$ , respecto del espesor de la probeta, expresada en porcentaje  $\pm 0,1\%$ , para  $N$  ciclos de carga Ec. (4):

$$PR_{aire} = \frac{H_i}{h} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

Donde,

$H_i$  : huella o deformación permanente promedio en función del número de ciclos aplicados en mm.

$h$  : espesor de la probeta en mm.

La pendiente de ahuellamiento,  $WTS_{aire}$ , se calcula como Ec. (5):

$$WTS_{aire,ji} = \frac{H_j - H_i}{(j - i)} \left[ \frac{\text{mm}}{10^3 \text{ ciclos}} \right] \quad (5)$$

Donde:

$H_i$  : profundidad de la huella  $H$  para el ciclo  $i$ , en mm.

$H_j$  : profundidad de la huella  $H$  para el ciclo  $j$ , en mm.

La evolución de la profundidad de huella con el número de ciclos se presenta en la Figura 5, donde se aprecia en azul los valores medidos, en negro los valores máximos y mínimos de cada ciclo y en rojo los valores obtenidos a través de una regresión potencial.

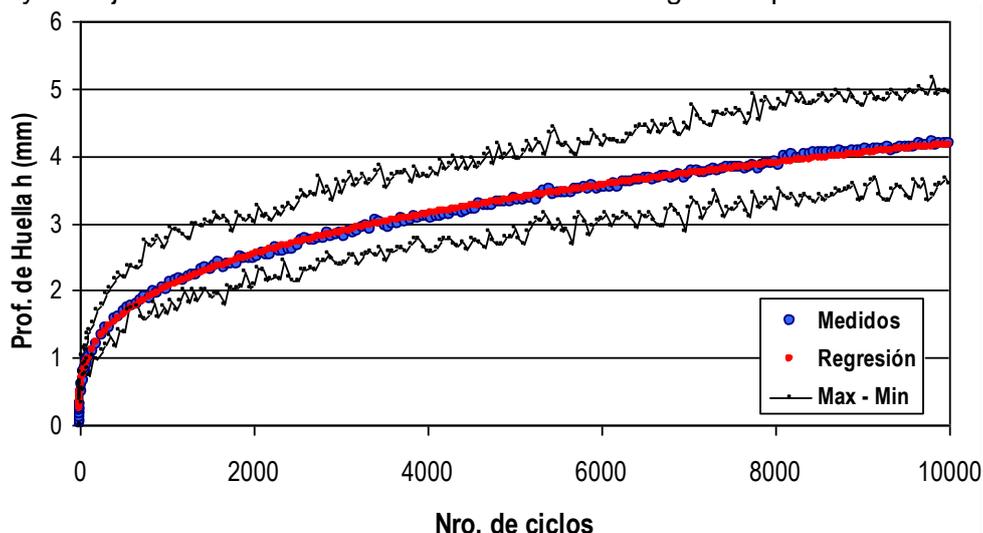


Figura 5: Profundidad de huella

#### 4. RESISTENCIA AL PUNZONADO

El ensayo de “Punzonado” está basado en desarrollos llevados a cabo, a partir del año 2002 en la Universidad Nacional de Kangwon, en Corea del Norte, por el Dr. Kwang W. Kim [22], quien propone un ensayo estático de resistencia a la deformación para la dosificación y comparación de mezclas bituminosas con vistas a su caracterización a la resistencia al ahuellamiento.

El objetivo de este ensayo es reproducir en laboratorio la carga inducida por el neumático a muy baja velocidad o casi estático, para un estado crítico de altas temperaturas (60°C) y considerando que la dirección de la aplicación de la carga es la misma que se produce in

situ respecto a la de compactación de la capa de mezcla asfáltica, tal como se esquematiza en la Figura 6.

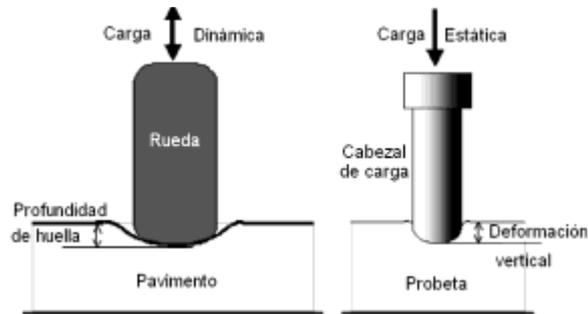


Figura 6: Comparación de las formas del neumático y el cabezal de carga

Además, si se tiene en cuenta que una rueda transmite al pavimento una carga a través de una sección aproximadamente circular, y dado que la forma del neumático no es una superficie plana sino que éste tiene “hombros” o forma redondeada en sus bordes, y que esta situación influye en la distribución de tensiones de compresión y corte en la capa del pavimento, la misma situación debe reproducirse en laboratorio al aplicar cargas sobre una probeta de mezcla bituminosa con el fin de representar el mismo estado de tensiones impuestas in situ, tal como se representa en la Figura 7.

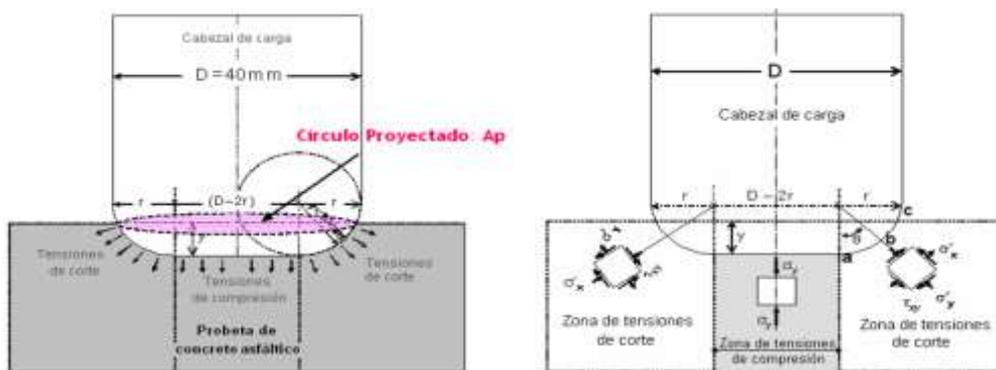


Figura 7: Sección del vástago de carga y tensiones impuestas.

Para ello se diseña un vástago o cabezal de carga con una sección proporcional a la del neumático. Sus características definitivas provienen del análisis de sensibilidad de la resistencia al punzonado,  $S_d$ , efectuada en el estudio de Doh, Y. S. et al [23] del cual surge que tanto el diámetro del vástago “D” como el radio de los bordes redondeados del mismo “r”, que se indican en la Figura 7, son variables importantes en el análisis de sensibilidad, no siendo así el diámetro de la probeta, dado que no se encontraron diferencias significativas entre los resultados de la resistencia a la deformación para los diámetros de 100 o 150 mm. De ello se concluye que tanto para probetas de 100 mm o 150 mm de diámetro las dimensiones más apropiadas para este vástago son un diámetro “D” de 40 mm y bordes con una curvatura correspondiente a un radio “r” de 10 mm. En la foto de la Figura 8 se aprecian los distintos vástagos estudiados.



Figura 8: Diferentes vástagos estudiados por Doh, Y. S et al. (2007).

Otra variable significativa es la velocidad de aplicación de la carga. Inicialmente el ensayo se llevó a cabo a una velocidad de carga de 50.8 mm/min correspondiente a la velocidad del ensayo Marshall, luego Sung Hyun Baek et al [24] en su investigación analizaron la variación de los valores de  $S_d$  dentro de un rango de velocidades de carga entre 10 y 70 mm/min, concluyendo que, para sus equipos de ensayo, la velocidad donde mejor correlaciona el valor de la resistencia a la deformación con los resultados del ensayo de rueda cargada es 30 mm/min, y que el valor de la resistencia  $S_d$  disminuye a medida que se reduce la velocidad de carga.

El ensayo consiste en aplicar a una probeta de mezcla bituminosa una carga, a una velocidad establecida, hasta alcanzar la rotura de la misma a una temperatura determinada. El vástago se introduce en la mezcla bituminosa provocando una deformación “y” cuando se aplica la carga P. Se registra la evolución de la carga “P” y la deformación “y” durante el ensayo tal como se muestra en la Figura 9.

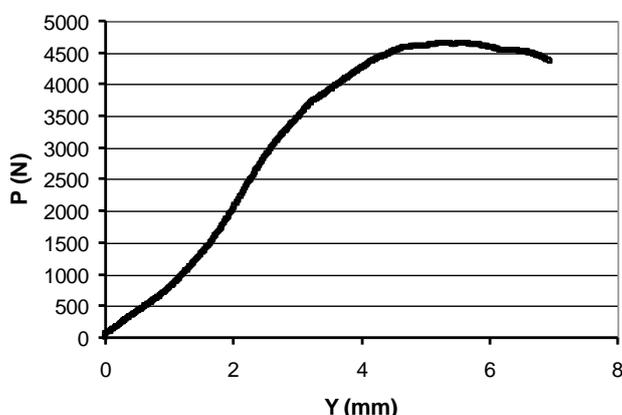


Figura 9: Curva carga vs deformación del ensayo de punzonado

La resistencia o tensión de deformación,  $S_d$ , se calcula como Ec. (6):

$$S_d = \frac{P}{A_p} \quad (6)$$

El área transversal ( $A_p$ ) del vástago, para  $D$  y  $r$  determinados, es variable en función de la profundidad que penetra el mismo dentro de la probeta, por lo tanto  $A_p$  es una función de la deformación “y” que sufre la probeta, variando entre un mínimo que corresponde a  $y = 0$  hasta un área máxima para  $y = r$ , Ec. (7)

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[ D - 2 \left( r - \sqrt{2ry - y^2} \right) \right]^2 \quad (7)$$

Para el caso particular de  $D = 40 \text{ mm}$  y  $r = 10 \text{ mm}$ , el área resulta Ec. (8)

$$A_p = \pi \left[ 10 + \left( \sqrt{20y - y^2} \right) \right]^2 \quad (8)$$

Remplazando en la Ec. (6) resulta Ec. (9):

$$S_d = \frac{0.32P}{\left[ 10 + \sqrt{20y - y^2} \right]^2} \quad (9)$$

Donde:

$S_d$ : resistencia a la deformación en (MPa);

$P$ : máxima carga de falla (N);

$A_p$ : área del círculo proyectado

$D$ : diámetro (mm) del cabezal de carga

$r$ : radio (mm) de curvatura en la base del cabezal de carga

$y$ : deformación vertical (mm.) de la probeta para  $y < r$ , mientras que para  $y > r$ ,  $y = r = 10$ .

El valor de  $S_d$  obtenido a partir de la Ec. (9) puede considerarse como una propiedad interesante, puesto que permite caracterizar a la mezcla respecto a su desempeño en deformación permanente, y a su vez, el mismo puede emplearse para obtener correlaciones con los parámetros de ahuellamiento, profundidad de huella y velocidad de deformación obtenidos en el WTT. En el Laboratorio Vial del IMAE se han llevado a cabo una serie de experiencias aplicando este ensayo a una velocidad de carga igual al del ensayo Marshall, 50.8 mm/min, y a una temperatura de 60°C según la metodología anteriormente descrita, la cual ha sido presentada en diferentes trabajos [25,26,27].

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1. Descripción de mezclas

En este estudio se elaboran y analizan mezclas asfálticas modificadas con la adición “por vía seca” de residuos plásticos en distintas formas (micronizado, pellets y escamas) [28]. Los elementos seleccionados para realizar esta experiencia se muestran en la Figura 10.



Figura 10: Materiales reciclados empleados

Cabe aclarar que los productos provenientes de silo bolsa poseen tanto polietileno de alta (PEAD) como de baja densidad (PEBD), mientras que los provenientes de film sólo polietileno de baja densidad (PEBD).

El “pelletizado” es una de las etapas dentro del proceso de reciclado de materiales plásticos: en la primera etapa los residuos plásticos se separan mediante diferentes criterios (color, forma, densidad, tamaño, etc.), luego, por medio de un proceso industrial, el plástico se muele y convierte en gránulos parecidos a las hojuelas del cereal (Granulado), el paso siguiente consiste en la limpieza del material, puesto que generalmente éstos están contaminados con comida, papel, piedras, polvo, pegamento, etc. y finalmente, en la cuarta etapa el plástico granulado es fundido y pasado a través de un tubo delgado para tomar la forma de cilindros continuos. Finalmente son enfriados en un baño de agua y una vez fríos son cortados en trozos denominados pellets (Figura 11).



Figura 11: Proceso de pelletizado

El “micronizado” es un proceso realizado en forma posterior al pelletizado, en el cual se vierte el material plástico en forma de pellets dentro de un molino especialmente diseñado para realizar esta tarea, como se muestra en la Figura 12. Friccionando el producto entre dos discos, uno fijo y otro giratorio a altas revoluciones, se obtienen partículas de plástico de pequeño tamaño que oscilan entre décimas de milímetro a milímetro aproximadamente.



Figura 12: Molino para micronizado

Respecto al procedimiento empleado para la incorporación de los plásticos a la mezcla se adopta como modalidad una muy similar a la empleada en mezclas asfálticas con fibras. Esto es factible de llevarse a cabo puesto que ambos materiales (plásticos y fibras) presentan formas similares y se encuentran a temperatura ambiente. Dicho procedimiento puede sintetizarse en los siguientes pasos:

- Calentamiento de áridos y asfalto,
- Adición de plásticos (a temperatura ambiente) al árido caliente.
- Mezclado de ambos materiales,
- Adición de asfalto,
- Homogeneización, colocación en horno y remezclado a la media hora,
- Transcurrida media hora más, nueva homogeneización y compactación de probetas.

NOTA: Las temperaturas de mezclado y compactación difieren según sea el asfalto empleado en las mezclas.

En total son evaluadas dieciséis mezclas diferentes, cuya nomenclatura y descripción se detalla a continuación:

CA30: mezcla de control, límite inferior elaborada con asfalto tipo CA30

AM3: mezcla de control, límite superior respecto a la calidad o valor considerado como esperado en una mezcla modificada, elaborada con asfalto modificado comercial tipo AM3

30+x M: Mezcla asfáltica con adición de x% de polietileno micronizado elaborada con CA30

30+x P: Mezcla asfáltica con adición de x% de polietileno pellets elaborada con CA30

20+x M: Mezcla asfáltica con adición de x% de polietileno micronizado elaborada con CA20

20+x P: Mezcla asfáltica con adición de x% de polietileno pellets elaborada con CA20

30+x SBE: Mezcla asfáltica con adición de x% de Silo bolsa escamas elaborada con CA30

30+x SBP: Mezcla asfáltica con adición de x% de Silo bolsa pellets elaborada con CA30

Las mezclas que sirven como base para la comparación y evaluación de la influencia de la incorporación de plásticos adoptadas se corresponden con una mezcla asfáltica en caliente, tipo densa, para base. Las dosificaciones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de las mezclas asfálticas (% aporte en peso)

Nombre Mezcla	12-19 mm %	6-12 mm %	0- 6 mm %	filler %	Asfalto %	Plástico %	Tipo plástico	Tipo Asfalto
CA30	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	0	-	CA30
AM3	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	0	-	AM3
30+2M	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	2	Film PE micronizado	CA30
30+3M	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	3		CA30
30+2P	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	2	Film PE pellets	CA30
30+3P	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	3		CA30
20+2M	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	2	Film PE micronizado	CA20
20+3M	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	3		CA20
20+2P	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	2	Film PE pellets	CA20
20+3P	23.83	25.73	44.79	0.95	4.70	3		CA20
30+2 SBE	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	2	Silo bolsa escamas	CA30
30+4 SBE	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	4		CA30
30+6 SBE	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	6		CA30
30+2 SBP	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	2	Silo bolsa pellets	CA30
30+4 SBP	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	4		CA30
30+6 SBP	26.63	14.27	53.25	0.95	5.00	6		CA30

En la Figura 13 se muestra la curva granulométrica resultante y el uso granulométrico considerado.

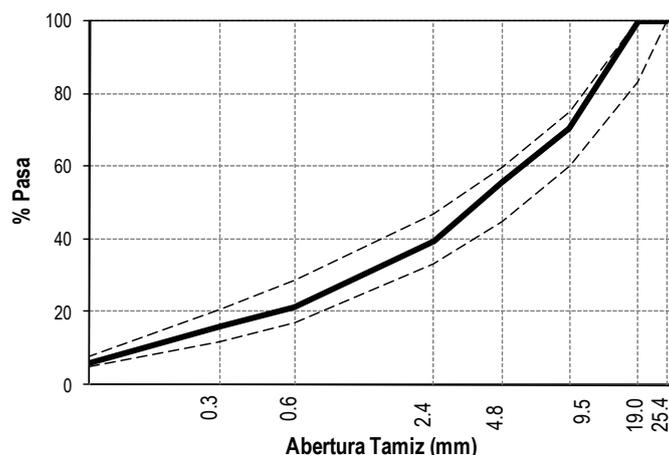


Figura 13: Curva granulométrica de las mezclas asfálticas

## 5.2. Resultados de ensayos

A continuación se presentan los resultados de ensayos obtenidos en Laboratorio para todas las mezclas planteadas.

### 5.2.1. Módulo Dinámico

Se ensayaron 2 probetas gemelas por cada tipo de mezcla. Se realiza la determinación del módulo dinámico por tracción indirecta. Para poder trazar la curva maestra Ec. (1) aplicando el principio de equivalencia frecuencia-temperatura, se ensayan las probetas a 0, 10, 20, 30 y 40°C aplicando cargas sinusoidales de 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.1Hz de frecuencia. La Figura 14 presenta las curvas maestras obtenidas para las mezclas con adición de los diferentes plásticos para una frecuencia de referencia de 10 Hz y las mezclas límites CA30 y AM3.

El comportamiento general para mezclas convencionales, como la CA30, indica que los valores del módulo dinámico son altos a bajas temperaturas y bajos a altas temperaturas, lo cual los torna muy rígidos o muy deformables respectivamente. Cuando se emplean asfaltos modificados, como el AM3, se busca disminuir esta diferencia en los valores del módulo debido a la temperatura, para mejorar su comportamiento frente a la fisuración y el ahuellamiento. La propiedad que mide cuan variable es una mezcla respecto de la temperatura se denomina susceptibilidad térmica, cuánto menos susceptible sea mejor será su comportamiento.

Para las mezclas en estudio, se observa una muy importante reducción de la susceptibilidad térmica a medida que aumenta el contenido de material incorporado, con comportamiento similar al de la mezcla asfáltica elaborada con asfalto modificado AM3, en algunos casos incluso mejor. Las mezclas con asfaltos modificados con polietileno micronizado presentan un comportamiento que oscila entre las mezclas de control.

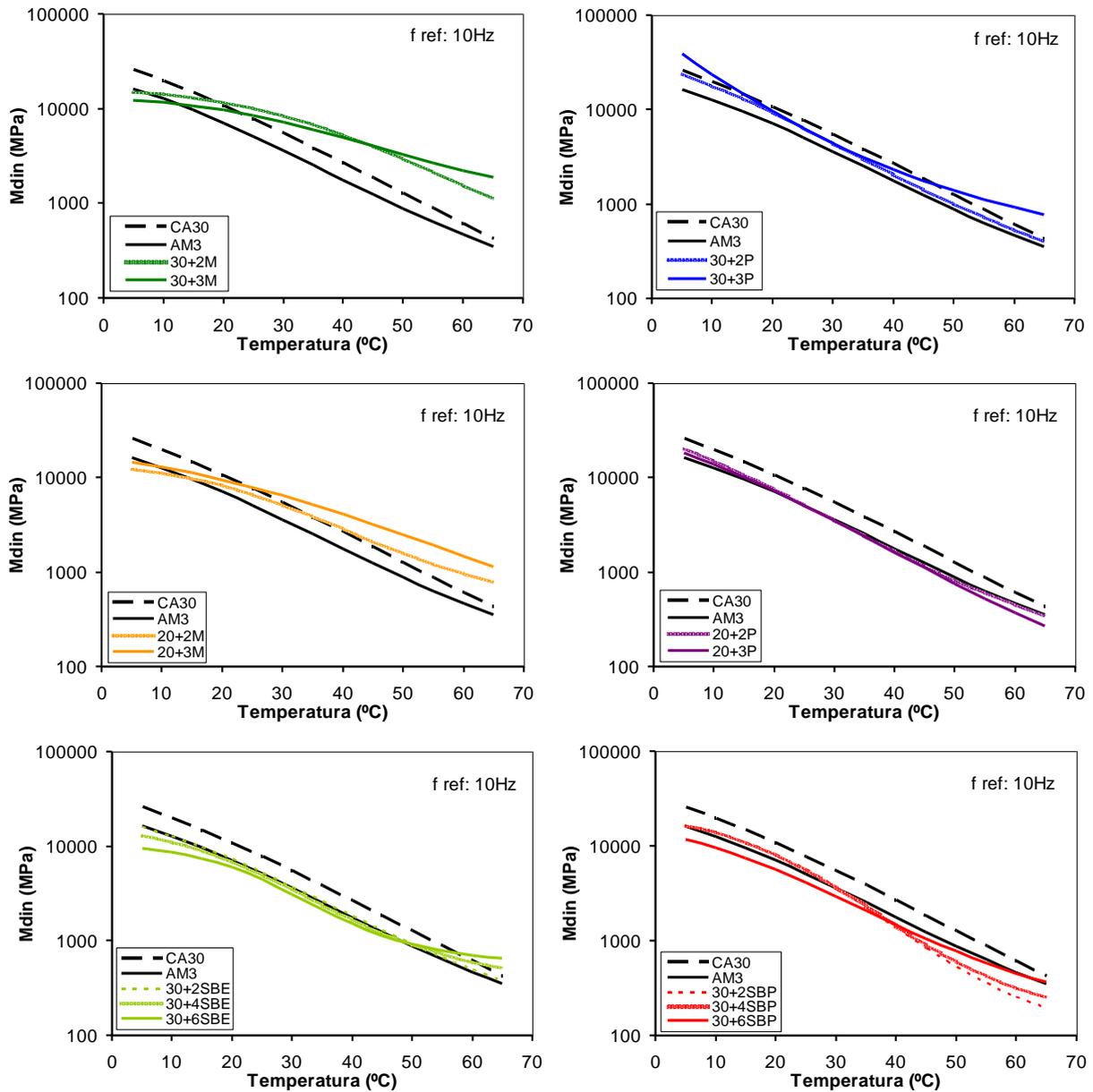


Figura 14: Curvas maestras de Módulo dinámico de las mezclas asfálticas

### 5.2.2. Comportamiento en deformación permanente, ensayo WTT

Se evalúan la Profundidad de ahuellamiento proporcional,  $PR_{aire}$ , Ec. (4) y la Pendiente de ahuellamiento,  $WTS_{aire}$  Ec.(5)

En la Figura 15 se muestran gráficas de la evolución de la profundidad de huella en función del número de ciclos. La Figura 16, Figura 17 y Figura 18 presentan comparativas para los valores de profundidad de huella proporcional a los 10000 ciclos,  $Pr_{10000}$ , velocidad de deformación 5000-10000,  $WTS$ , y ahuellamiento a los 10000 ciclos para las mezclas en estudio.

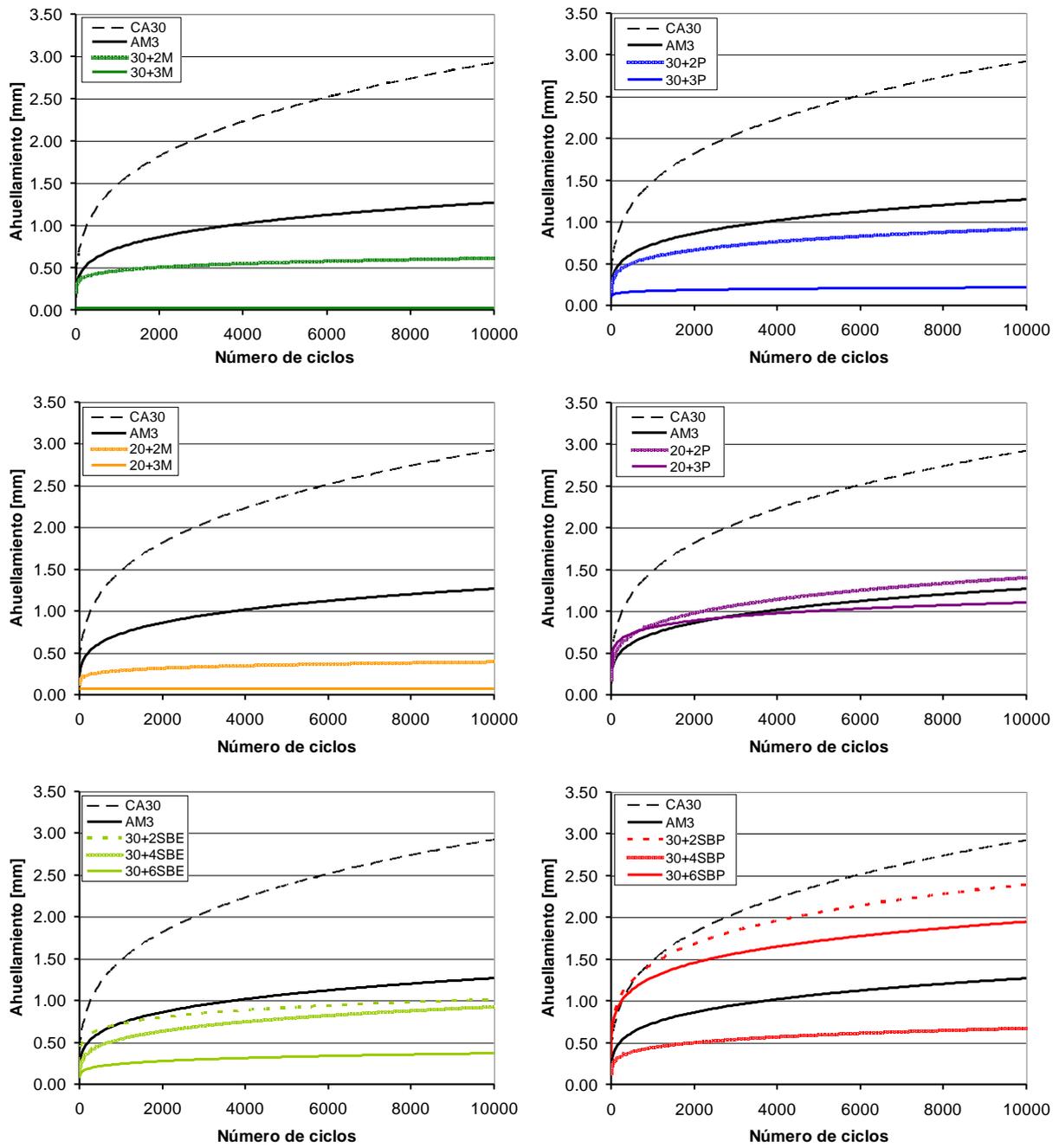


Figura 15: Comparativa evolución de ahuellamiento con el número de ciclos

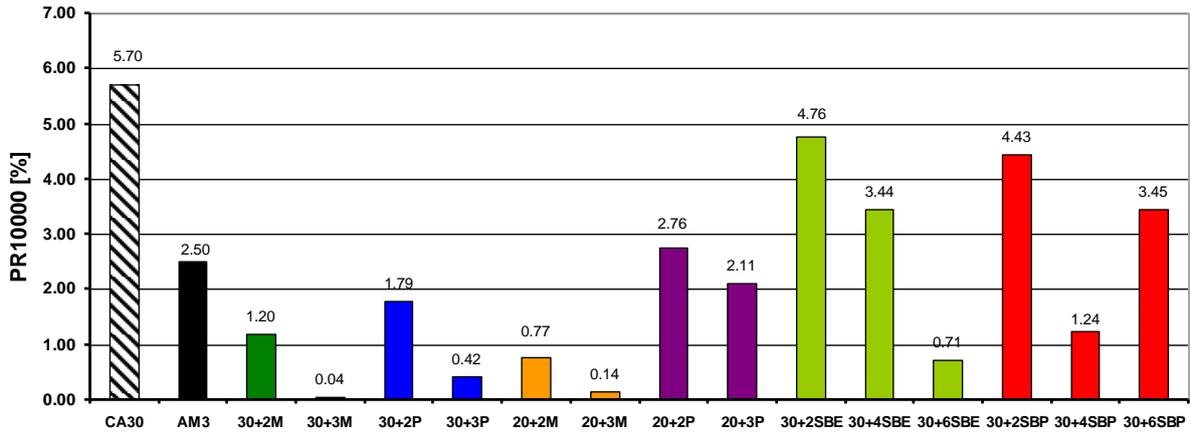


Figura 16: Profundidad de huella proporcional, PR10000

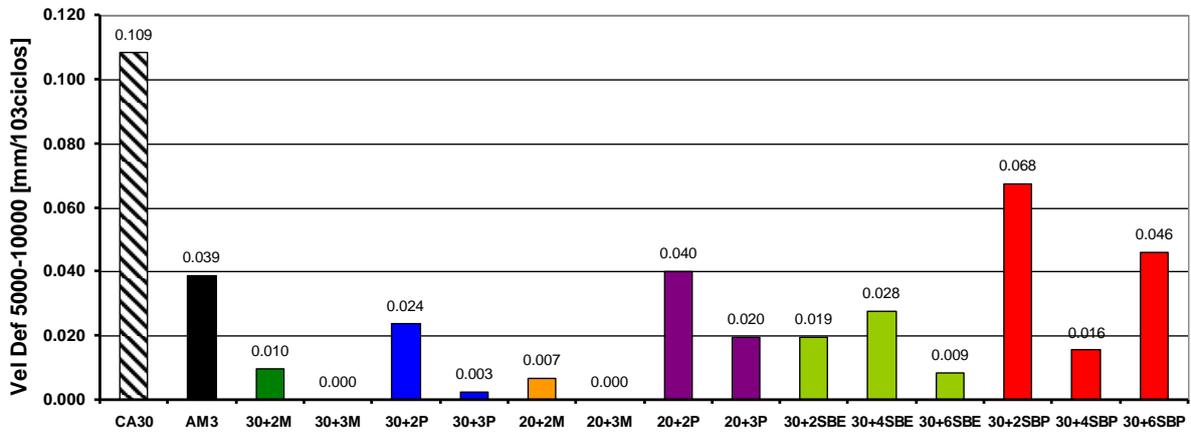


Figura 17: Velocidad de deformación, WTS

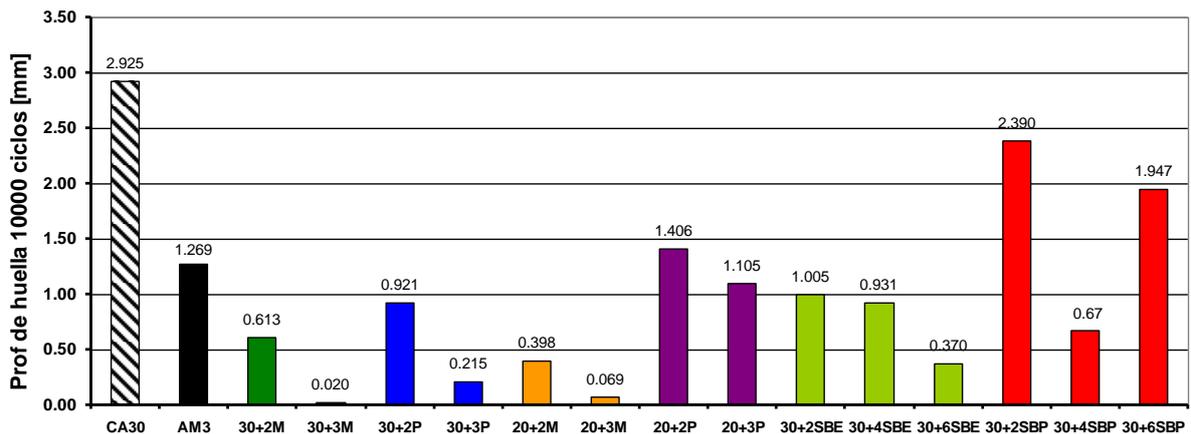


Figura 18: Profundidad de huella a los 10000 ciclos

En líneas generales se observa una marcada reducción del ahuellamiento en las mezclas con agregado de plásticos. Todas las mezclas presentan mejor comportamiento frente a las deformaciones permanentes con respecto a las mezclas de base.

### 5.2.3. Ensayo de Resistencia a la Deformación o de “Punzonado”

En la Figura 19 se presentan los valores obtenidos de Sd en el ensayo de punzonado.

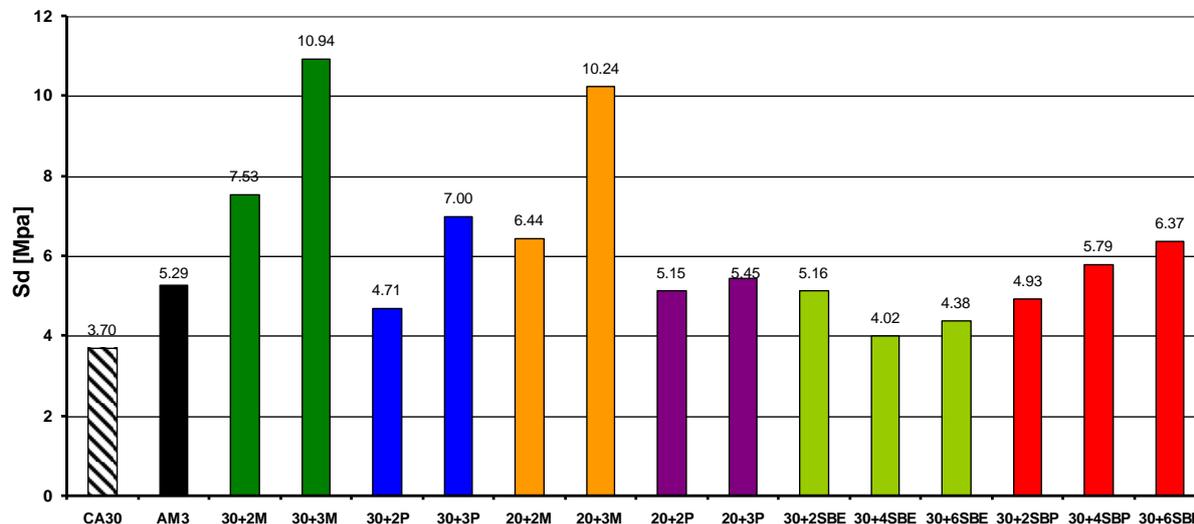


Figura 19: Valores de Sd

Analizando los resultados encontrados, se observa un aumento de valor de resistencia, Sd, en las mezclas con adición de plásticos, siendo iguales o mayores que las mezclas de control.

Además, para relacionar los resultados de este ensayo con los evaluados en el WTT se muestra en la Figura 20 una gráfica donde se presentan los parámetros Sd obtenidos del ensayo de punzonado con la profundidad de huella proporcional, Pr, obtenida en el ensayo WTT.

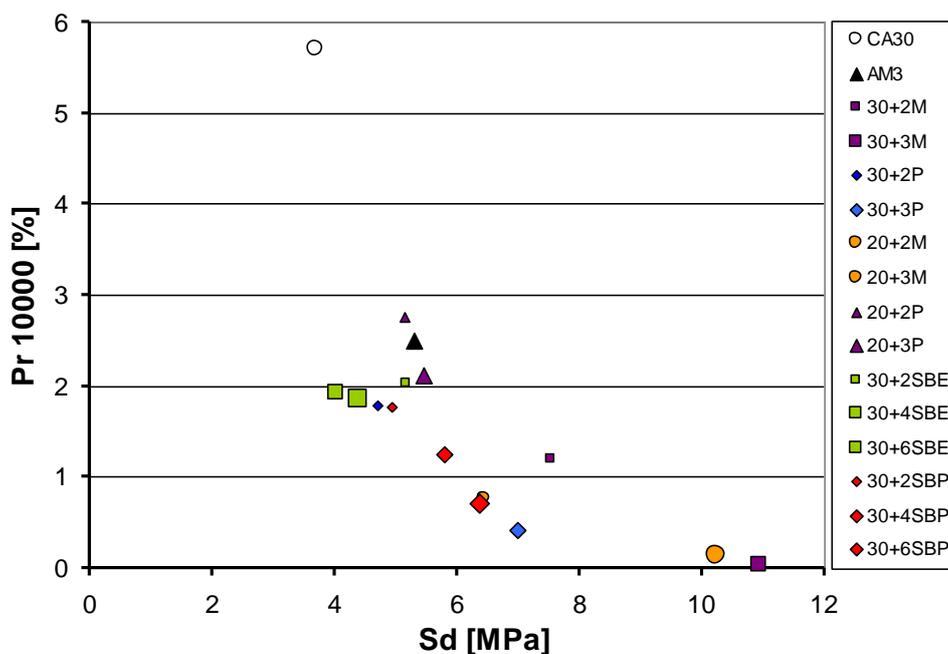


Figura 20: Relación entre valores de Sd y Pr 10000

Se observa que a mayor valor de Sd, menor ahuellamiento para todas las mezclas con adición de plásticos. A su vez comparando las mezclas base entre sí se tiene que para igual resistencia Sd menor deformación en la mezcla con AM3. Es de esperar un mejor comportamiento frente al ahuellamiento para las mezclas con adición de plásticos.

## 6. CONCLUSIONES

Respecto a la incorporación de plásticos “por vía seca” puede enunciarse que:

- Se desarrolló una metodología de incorporación “por vía seca” de los plásticos durante la elaboración de las distintas mezclas asfálticas.
- Las mezclas obtenidas a partir de esta técnica presentan buena trabajabilidad. Cabe destacar que la incorporación es mejor a medida que el tamaño del plástico reciclado se reduce, como es el caso del polietileno micronizado.
- Se observa para todas las mezclas con adición de plásticos una muy importante reducción de la susceptibilidad térmica a medida que aumenta el contenido de material incorporado, con comportamiento similar al de la mezcla asfáltica elaborada con asfalto modificado AM3, en algunos casos incluso mejor.
- Se observa una mejora, respecto a la mezcla de control CA30, de las propiedades de las mezclas con adición de plástico (todos) en su comportamiento en deformación permanente.
- En particular, de todos los plásticos estudiados, el mejor desempeño, basado en los ensayos de laboratorio, se presenta en las mezclas elaboradas con adición de polietileno micronizado (3%).
- Como conclusión final puede decirse que se ha logrado cumplir con el objetivo de desarrollar un procedimiento para obtener una mezcla asfáltica con adición de plásticos mediante técnicas de incorporación por vía seca con mejores prestaciones que la mezcla asfáltica base de partida, es decir se ha podido elaborar una mezcla más sustentable, con los consecuentes beneficios ambientales.
- Su aplicación concreta en obra va a depender de la comprobación de su ejecución in situ y que los costos del producto reciclado sean competitivos respecto a otros aditivos mejoradores de las mezclas asfálticas y/o ligantes asfálticos. La experiencia internacional indica que estos materiales reciclados al igual que el caucho proveniente de neumáticos usados es fuertemente subsidiado por los gobiernos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M., Santamaría E., Gavilán E. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas. Reporte Técnico de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR, RT-ID 06 02, Página Web de la FCEIA-UNR, 2006.
- [2] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M. Análisis Comparativo de Procedimientos de Laboratorio para Evaluar el Ahuellamiento de Mezclas Asfálticas. XXXIV Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 2006.

- [3] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M., Andreoni R., Lostumbo D. Influencia de los Factores de Carga y de Servicio en el Ensayo de Rueda Cargada. 14º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Cuba, 2007 y XXXV Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 2008.
- [4] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M., Andreoni R., Andreoni S., Balestrini G. Ahuellamiento. Desarrollo de una Metodología para el Control en Obra de Mezclas Asfálticas. XXXVI Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 2010.
- [5] European Committee for Standardization. Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 22: Wheel Tracking, EN 12697-22:2003: E (2003).
- [6] GEO Argentina 2004. Perspectivas del Medio Ambiente en la Argentina. Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación y Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2004.
- [7] Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010. Organización Panamericana de la Salud.
- [8]<http://estadisticas.ambiente.gob.ar/2010>
- [9] Estudio de Calidad de los Residuos Sólidos Urbanos del Área Metropolitana de Buenos Aires. Tercer Informe de Avance. Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE) e Instituto de Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires. Argentina, 2011.
- [10][http://www.rosario.gov.ar/sitio/desarrollo\\_social/empleo/residuos\\_2.jsp](http://www.rosario.gov.ar/sitio/desarrollo_social/empleo/residuos_2.jsp)
- [11] Punith V., Veeraragavan A. Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive. Journal of Materials in Civil Engineering 19(6):500–507(2007).
- [12] Casey D., McNally C., Gibney A., Gilchrist M. Development of a Recycled Polymer Modified Binder for Use in Stone Mastic Asphalt. Resources, Conservation and Recycling 52 1167–117(2008).
- [13] Fuentes-Audén C., Sandoval J. A., Jerez A., Navarro F. J., Martínez-Boza F. J., Partal P., Gallegos C. Evaluation of Thermal and Mechanical Properties of Recycled Polyethylene Modified Bitumen. Polymer Testing 27 1005–1012(2008).
- [14] Rondón H., Reyes F., Moreno L. Caracterización Dinámica de una Mezcla Densa en Caliente Modificada con un Desecho de Policloruro de Vinilo (PVC). XV Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Portugal, 2009.
- [15] Martínez F., Andreoni R., Poncino H. Utilización de Cenizas Volantes como Filler de Mezclas Asfálticas, IX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Paraguay, 1997.
- [16] Martínez F., Angelone S., Andreoni R., Martinuzzi R. Caracterización de Mezclas Asfálticas Modificadas con Adición de Caucho Reciclado de Neumáticos Descartados. XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Cuba, 2007.
- [17] Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M.; Martínez, F. Reuse of Waste Polyethylene from Silo Bags in Asphalt Mixtures. 2nd ISAP, Brasil, 2012.
- [18] ASTM D3497 - 79(2003): Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.
- [19] AASHTO TP62: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt.
- [20] STM 4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus for bituminous Mixtures.

- [21] Martínez F., Angelone S. Validación del Modulo Dinámico de Mezclas Asfálticas usando el Ensayo de Tracción Indirecta. XVI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Brasil, 2011.
- [22] Kim KW, Lee MS, Kim JE, Choi SJ. A. Fundamental Approach for Developing Deformation Strength based on Rutting Characteristics of Asphalt Concrete. J Korean Soc Pavement Eng 4(4):23–40 (2002).
- [23] Young S. Doh, Kyong K. Yun, Serji N. Amirkhanian, Kwang W. Kim. Framework for Developing a Static Strength Test for Measuring Deformation Resistance of Asphalt Concrete Mixtures. Construction and Building Materials 21 2047–2058(2007).
- [24] Baek S., Kim J. C., Doh Y. S., Kim K. W. Optimum Loading Speed for Deformation Strength Test of Bitumen Mixtures. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials - The 7th Int. RILEM Symposium - Taylor y Francis Group, London, ISBN 978-0-415-55854-9, Greece, 2009.
- [25] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M., Andreoni R., Andreoni S., Balestrini G. Ahuellamiento. Desarrollo de una Metodología para el Control en Obra de Mezclas Bituminosas. XXXVI Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 2010.
- [26] Angelone S., Martínez F., Cauhape Casaux M., Andreoni R., Andreoni S., Balestrini G. Ensayo de Punzonado para el Control en Obra de Mezclas Asfálticas. XVI CILA, Río de Janeiro, Brasil, 2011.
- [27] Angelone S., Cauhapé Casaux M., Martínez F. Implementation of a Static Strength Test for Evaluating the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures and its Application for Quality Controls. 12th ISAP Conference on Asphalt Pavements. Book of Proceedings, 679- 688. ISSN: 978-1-315-73675-4. Raleigh, USA. Jun 2014
- [28] Cauhapé Casaux M. Reutilización de Desechos y Residuos Plásticos Urbanos en la Construcción de Carreteras. Tesis de Maestría en Ingeniería Vial. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Argentina, 2013.