

Anales LEMIT. Serie III, Año 1 - N°3

NUEVAS TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES APLICADAS A LA PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA



**NUEVAS TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES
APLICADAS A LA
PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA**

Nuevas tecnologías sustentables aplicadas a la pavimentación asfáltica por Jorge Agnusdei, Rosana Marcozzi, Francisco Morea. - 1a ed. - La Plata : Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - LEMIT, 2010.
110 p.; 32x22 cm.

ISBN 978-987-26159-6-3

1. Ingeniería Vial. 2. Nuevas Tecnologías. I. Marcozzi, Rosana, II. Morea, Francisco.
CDD 624.1

Título:

Nuevas tecnologías sustentables aplicadas a la pavimentación asfáltica.

Editor:

Ing. Rosana Marcozzi

Diseño y diagramación:

Prof. Sebastian Marquez

Cantidad de ejemplares: 500

Esta publicación es patrocinada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires a través de un Subsidio para Publicaciones Científicas y Tecnológicas (PCT09).



Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida por algún método gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo los sistemas de fotocopias, registro magnetofónico o de alimentación de datos, sin expreso consentimiento del editor.

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced by any method graphic, electronic or mechanical, including photocopying systems, magnetic recording or record data feed, without written permission from the publisher.

INDICE

1.- ENERGIA UTILIZADA EN LOS PROCESOS DE PAVIMENTACION ASFALTICA	7
1.a.- Temperaturas óptimas de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos modificados	9
1.b.- Energía utilizada en los procesos constructivos.Utilización del Compactador Giratorio Superpave para evaluar la compactabilidad de las mezclas asfálticas	15
1.c.- Optimización de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta mediante el concepto de viscosidad de corte cero	23

2.- MEZCLAS FABRICADAS A TEMPERATURAS REDUCIDAS Vs. MEZCLAS TIBIAS	29
2.a.- Efectos de la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas fabricadas en caliente. Primera parte	31
2.b.- Efectos de la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas fabricadas en caliente. Segunda parte	43
2.c.- Ventajas de las mezclas tibias	51
2.d.- Mezclas tibias tecnologías, diseño y producción	53
2.e.- Ensayos de laboratorio para evaluar la compactabilidad de mezclas asfálticas colocadas a bajas temperaturas	59
2.f.- Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tibias	67
2.g.- Propiedades reológicas de ligantes asfálticos con aditivos químicos usados en mezclas tibias	77

3.- VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA	87
3.a.- Concreto asfáltico en caliente como medio para la valorización de residuos industriales	89



“EJEMPLO PERENNE DE GENEROSIDAD Y HONESTIDAD INTELECTUAL”

El Doctor Agnusdei nació en La Plata, el 26 de noviembre de 1935. Con el título de Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de La Plata, orientó su quehacer profesional hacia la Tecnología de los Materiales Asfálticos.

En abril del año 1957 ingresó al LEMIT como técnico llegando a ser becario en 1961. En el año 1962 recibió el premio otorgado por la DNV en el concurso vial Día del camino, por el trabajo “Susceptibilidad térmica de asfaltos argentinos y sus mezclas”.

Se perfeccionó en el Road Research Laboratory de Inglaterra desde el año 1965 al 1966 luego de lo cual asumió el cargo de Jefe de la División Derivados del Petróleo desde el año 1967 hasta 1976. En los últimos años, en calidad de asesor, retomó el vínculo con el LEMIT, aportando su valiosa colaboración en el Área de Tecnología Vial.

En el campo de los materiales asfálticos, su dedicación, talento, conocimientos y generosidad le valieron un prestigio que trascendió ampliamente las fronteras de nuestro país.

Su aporte a la Ingeniería Vial -en trabajos científicos, docencia, congresos, asesoría- es invaluable.

Fue una pieza fundamental en la Comisión Permanente del Asfalto que lo tuvo como presidente en varias oportunidades y como miembro activo durante más de 40 años.

Fue fundador del Congreso Iberoamericano del Asfalto al que su compromiso dio la trascendencia internacional que actualmente tiene.

Colaboró en innumerables Maestrías y Doctorados en Universidades de Argentina, Latinoamérica, España, en las cuales dejó una huella ejemplar para varias generaciones de estudiantes y profesionales.

Fue jurado del “Premio Internacional a la innovación en carreteras Juan Antonio Fernández del Campo” desde su primera edición, en 2005.

A este rico currículum debemos agregarle que fue una persona de bien, con profundas convicciones y un amigo ejemplar. De carácter alegre, siempre tenía palabras de aliento para ayudarnos a superar las dificultades.

Su abnegación y profesionalismo nos ha dejado un ejemplo superador. Sin duda todos los que compartimos parte del camino con él hemos salido enriquecidos.

ENERGIA UTILIZADA EN LOS PROCESOS DE PAVIMENTACION ASFALTICA

Dr. Jorge O. Agnusdei

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años el crecimiento del uso de asfaltos modificados con polímeros ha sido un gran aporte en la durabilidad de los pavimentos. La meta de estos últimos años ha sido además implementar en nuestro país la disminución de las temperaturas de fabricación de los pavimentos con asfaltos modificados y con algunos asfaltos especiales mediante el uso de nuevos criterios que impliquen tanto la optimización de la energía y recursos consumidos como la calidad del producto resultante planteada desde el punto de vista de su durabilidad.

TEMPERATURAS ÓPTIMAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE MEZCLAS CON ASFALTOS MODIFICADOS

Ana Inés Fernández, Jorge O. Agnusdei, Omar A. Iosco

De acuerdo a los criterios corrientes para el diseño de las mezclas asfálticas, tanto por el método Marshall como el indicado por SHRP, las temperaturas óptimas de mezclado y compactación son las correspondientes a las viscosidades del ligante de 0,17 y 0,28 Pa.s, respectivamente.

Las condiciones de mezclado y compactación, funcionan bien para los asfaltos convencionales, partiendo de la base que los mismos se comportan como fluidos Newtonianos a temperaturas elevadas, con independencia entre la viscosidad y la velocidad de corte.

En el caso de los asfaltos modificados con polímeros, los mismos presentan viscosidades mucho más elevadas que los convencionales, por lo que es necesario elevar considerablemente la temperatura de mezclado para lograr tanto un correcto recubrimiento de los agregados como una correcta colocación de la mezcla. Estas temperaturas podrían causar algún daño en las propiedades de los asfaltos.

Los asfaltos modificados, aún a temperaturas elevadas, los mismos se comportan como fluidos no Newtonianos con dependencia entre la viscosidad y la velocidad de corte y podría ser que las temperaturas óptimas de mezclado y compactación, calculadas de la misma manera que para los asfaltos convencionales, resultaran sin justificación, más elevadas que las necesarias.

En este trabajo se aplica el concepto de viscosidad a corte cero que, de acuerdo a recientes investigaciones, permite calcular las temperaturas de mezclado y compactación con mayor certeza. En el mismo se analizan una serie de asfaltos modificados con polímeros de producción nacional fabricados con distintos tipos de polímeros.

INTRODUCCIÓN

Las recomendaciones indicadas por los manuales del Instituto del Asfalto de EE.UU. para el mezclado y compactación de las mezclas asfálticas preparadas en el laboratorio de acuerdo al procedimiento Marshall empleando asfaltos convencionales, indican que la temperatura óptima de mezclado es la que corresponde a una viscosidad del ligante de 0,17 Pa.s y para la compactación, 0,28 Pa.s. En el caso de los asfaltos modificados con polímeros, estas viscosidades pueden

lograrse a temperaturas muy elevadas, figura 1, superiores a 165 °C (1) que pueden llegar ser innecesarias, con el consiguiente riesgo de la degradación de los polímeros y alteración del ligante por pérdida de componentes volátiles.

Por otro lado, los asfaltos modificados, aún a temperaturas elevadas, muestran una pronunciada dependencia de su viscosidad con la velocidad de fluir variable no contemplada en la construcción de la carta de viscosidad según ASTM D 2493, lo que puede conducir a errores significativos si no se la tiene en cuenta en la determinación. En la figura 2 puede apreciarse lo expresado.

En un intento por optimizar las temperaturas más convenientes de mezclado y compactación de las mezclas con asfaltos modificados, diversas metodologías han sido desarrolladas para su obtención. Por un lado, Yildirim (2) sugiere que las determinaciones de viscosidad sean realizadas a elevadas velocidades de fluir, por suponer que esas serán a las que estará sometido el asfalto durante la compactación. Por otro lado, Bahia (3) propone la utilización del concepto de viscosidad a corte cero (ZSV), basado en que estudios de correlación entre el contenido de vacíos de mezclas asfálticas y medidas de viscosidad a diferentes velocidades de fluir, mostraron que la correlación mejoraba cuando la viscosidad se determinaba a bajos valores de velocidad de fluir.

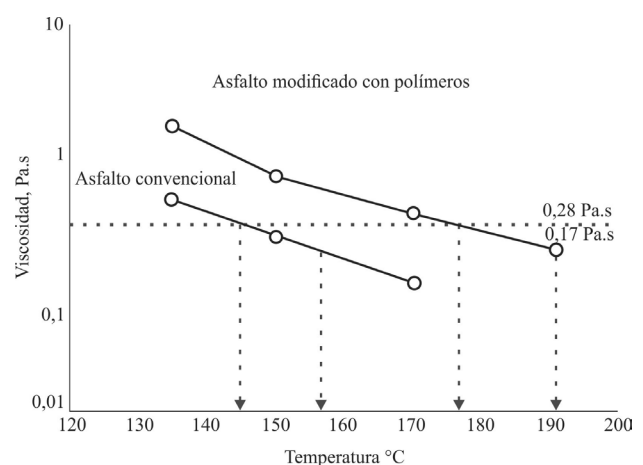


Figura 1: Carta de viscosidad (ASTM 2493). Viscosidades de mezclado y compactación.

Trabajo Técnico presentado en el XII° Congreso Iberoamericano del Asfalto (2003)

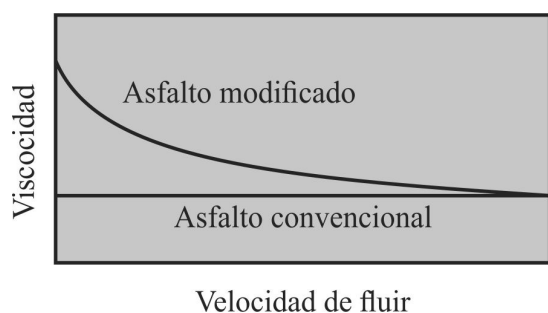


Figura 2: Comportamiento reológico de los asfaltos convencionales y modificados.

Reológicamente los fluidos pseudoplásticos muestran un comportamiento Newtoniano a muy bajas velocidades de fluir, teniendo una viscosidad definida e independiente de la velocidad de fluir. Esta viscosidad, η_0 , es la viscosidad a corte cero (4). Su estimación se puede realizar por los siguientes métodos:

- 1- Por extrapolación de las medidas de viscosidad a una velocidad de fluir cero mediante modelos de viscosidad como función de la velocidad de fluir.
- 2- Mediante ensayos de creep y recuperación, simple o múltiple, hasta alcanzar el estado de fluidez constante (Steady state flow) (5).

Cuando se trata de temperaturas mayores a 100°C, como es nuestro caso, el primer método es preferible. Entre los modelos de viscosidad se encuentran: Zeng (3), Cross-Williamson (6), Power-Law (7), modelo exponencial de De Kee (8) y Carreau-Yasuda (9). En este trabajo se escogió, por su buena correlación, el modelo de Zeng:

$$\eta = \eta_0 + (\eta_\infty - \eta_0) e^{-(d\gamma/dt)^k}$$

Donde, η_0 es la viscosidad de corte cero, η_∞ es la viscosidad para la velocidad de corte infinita, $d\gamma/dt$ es la velocidad de fluir y k es una constante del modelo.

Bahía (3) en su trabajo que trata el cálculo de las temperaturas óptimas de mezclado y compactación de las mezclas fabricadas con asfaltos modificados con polímeros, fija como hipótesis de trabajo que las temperaturas de compactación no deben ser superiores a los 150 °C y las de mezclado 160 °C. De acuerdo a resultados por él obtenidos para estas temperaturas, las viscosidades a corte cero para el mezclado y para la compactación son fijadas en 3,0 Pa.s y 6,0 Pa.s respectivamente. Sin embargo, para evitar la complejidad de las mediciones de viscosidad a corte cero (ZSV), Bahía simplifica el procedimiento realizando las medidas de viscosidad a una velocidad de fluir igual a 6,8 s-1 que corresponde a una velocidad de giro igual a 20 rpm con el rotor 27 del viscosímetro Brookfield, tal como lo establece el procedimiento Superpave para el cálculo de la viscosidad a 135 °C. De acuerdo a su experiencia, Bahía establece nuevas condiciones de referencia para esta alternativa que son 0,75 Pa.s y 1,4 Pa.s para las viscosidades óptimas de mezclado y compactación, respectivamente.

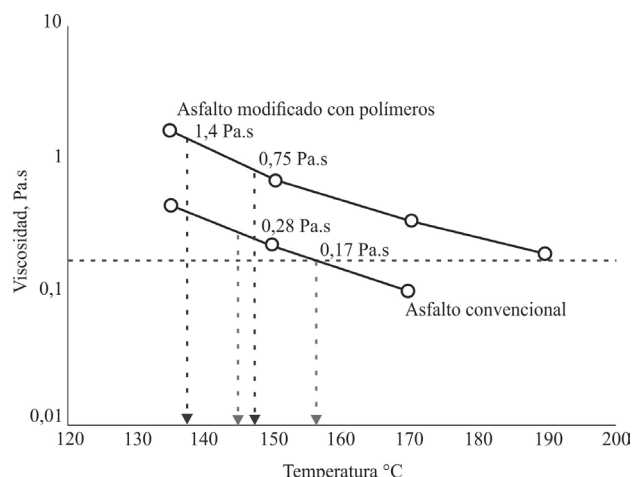


Figura 3: Viscosidades de mezclado y compactación para asfaltos modificados propuesta por Bahía.

Objetivos

El objetivo del presente trabajo es estudiar una serie de asfaltos modificados de producción nacional y hallar las temperaturas óptimas de mezclado y compactación empleando una metodología distinta a la utilizada actualmente, siguiendo los lineamientos propuestos por Bahía, que permita una disminución de éstas sin por ello alterar significativamente los procesos de mezclado y compactación.

Materiales

Los asfaltos estudiados se han identificado de la siguiente forma:

Asfalto N°	Modificante
1	SBS
2	SBS
3	SBS
4	SBS
5	SBR
6	EVA
7	EVA
8	EVA
9	Multigrado

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYO

Equipos

- Viscosímetro rotacional Brookfield modelo (RV) VDV-III apto para medir viscosidades a altas temperaturas.
- Accesorio termostático Thermosel para mantener la temperatura.

Determinación de la viscosidad de corte cero

La técnica ASTM D 4402 para la obtención de la viscosidad Brookfield se basa en la medida del torque necesario para mantener constante la velocidad de rotación del rotor, sumergido en una muestra de asfalto a una temperatura constante. El torque y la velocidad se

Asfalto N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modificador	SBS	SBS	SBS	SBS	SBR	EVA	EVA	EVA	Multigrado
Penetración a 25°C, 0,1 mm	63	72	62	57	54	33	55	69	47
Punto ablandamiento, °C	92.0	69.0	64.8	67.5	52.2	62.5	79.0	64.4	59.5
Recuperación elástica Torsional, %	86	85	77	86	33	29	48	56	-
Ductilidad a 25°C, cm	109	135	+150	110	+150	65	+150	38	+150



Figura 4: Viscosímetro rotacional con diversos rotores (Izq.) Celda térmica para ensayos a temperaturas elevadas (Der.)

emplean para determinar la viscosidad (1). En asfaltos modificados, aplicando distintas velocidades de rotación que se traducen en distintas velocidades de fluir, las viscosidades que se obtienen no son constantes, tal como se muestran en la Figura N° 2.

Para realizar el ensayo, se fijó una temperatura y se comenzó por la velocidad de rotación más baja posible que admite el rango del equipo, con un torque mayor a 10%. De los valores de viscosidad obtenidos, para cada determinación, se tomó el mayor. Se continuó de la misma forma para valores crecientes de la velocidad de rotación, con un tiempo de espera entre cada uno de dos minutos. Con estos pares de valores (viscosidad y velocidad de fluir) y mediante el modelo de Zeng, se halló la viscosidad de corte cero. Se repitió el procedimiento para temperaturas de 100°C, 135°C, 150°C, 170°C y 190°C. Estos valores se representaron en gráficos de ejes coordenados doble logaritmo de la viscosidad de corte cero en cPoise en ordenadas y logaritmo de la temperatura en grados Kelvin en abscisas (Figs. 5 á 13).

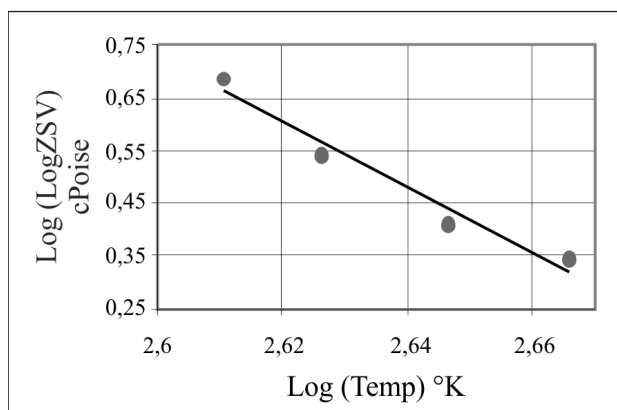


Figura 5: Viscosidad de corte cero vs. Temperatura para el asfalto N° 1.

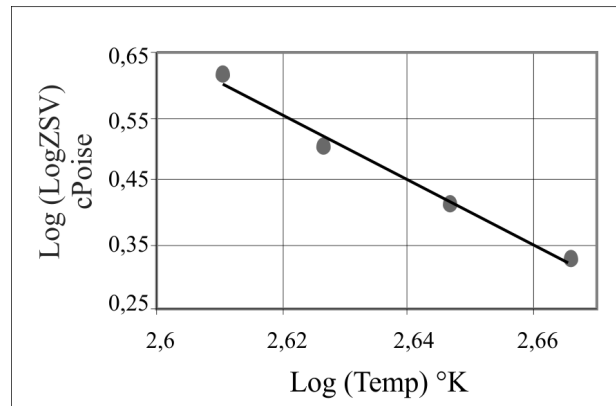


Figura 6: Viscosidad de corte cero vs. Temperatura para el asfalto N° 2.

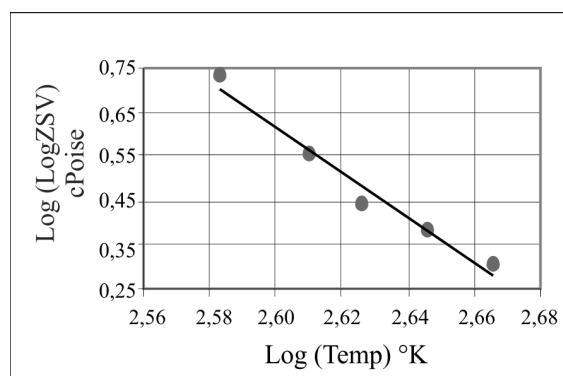


Figura 7: Viscosidad de corte cero vs. Temperatura para el asfalto N° 3.

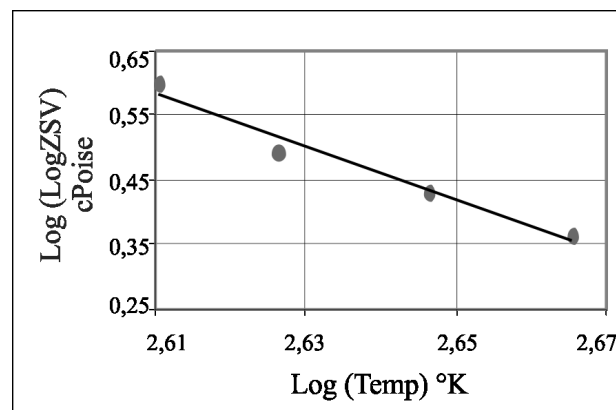


Figura 8: Viscosidad de corte cero vs. Temperatura para el asfalto N° 4.

Tabla 1: Temperaturas de mezclado obtenidas con los distintos métodos.

Asfaltos	Temperaturas de mezclado [°C]		
	ASTM D2493 0.17 Pa.s	ZSV 3 Pa.s	Simplificación 0.75 Pa.s
1	177	154	158
2	182	146	159
3	175	139	155
4	184	144	154
5	172	122	143
6	175	116	142
7	162	113	139
8	168	117	139
9	175	120	145

Tabla 2: Temperaturas de compactación obtenidas con los distintos métodos.

Asfaltos	Temperaturas de compactación [°C]		
	ASTM D2493 0.28 Pa.s	ZSV 6 Pa.s	Simplificación 1.4 Pa.s
1	171	148	150
2	174	140	149
3	168	133	146
4	174	136	141
5	162	112	131
6	164	106	128
7	152	103	120
8	159	108	127
9	165	110	132

Tabla 3

Asfalto N° 3 SBS	0.17 Pa.s	0.75 Pa.s
Temperatura de mezclado, °C	175	155
Tiempo de mezclado, s	35	50

Tabla 4

Asfalto N° 6 EVA	0.17 Pa.s	0.75 Pa.s
Temperatura de mezclado, °C	175	142
Tiempo de mezclado, s	40	45

de mezclado de 35 segundos. Para igual tiempo, la mezcla a 155°C aun no había logrado un buen recubrimiento de los agregados de mayor tamaño, por lo que se necesitó un tiempo mayor (50 segundos). En cuanto al asfalto N° 6, no presentó variaciones apreciables.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron una serie de asfaltos modificados de producción nacional.

En la mayoría de los asfaltos estudiados, para alcanzar las viscosidades recomendadas, se necesitaron temperaturas superiores a los 165°C.

Existen varios modelos de viscosidad que se pueden utilizar para analizar el comportamiento no-Newtoniano de los asfaltos modificados. Entre ellos, el modelo de Zeng es de simple aplicación y ha presentado una buena correlación. Sin embargo, no ha ocurrido lo mismo al comparar las temperaturas obtenidas por este procedimiento con las obtenidas mediante la simplificación en la medición de la viscosidad a corte cero.

Tanto las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a las viscosidades de corte cero 3 Pa.s y 6 Pa.s, como las correspondientes a viscosidades de 0.75 Pa.s y 1.4 Pa.s resultaron menores que las obtenidas para viscosidades de 0.17 Pa.s y 0.28 Pa.s.

Para los asfaltos N°1 y N°4 las temperaturas obtenidas a partir de la simplificación (viscosidades de 0.75 Pa.s y 1.4 Pa.s) son próximas a las correspondientes a las de la viscosidad de corte cero. Para el resto de los asfaltos existe una diferencia de entre 10°C y 20°C.

Las mezclas realizadas muestran que el mezclado podría realizarse a temperaturas menores que las utilizadas actualmente. Sin embargo, restaría observar el comportamiento de un número mayor de asfaltos modificados con diferentes mezclas, así como también realizar experiencias en planta asfáltica y en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP Report 459, 2001.
- Yildirim, Y., Solaimanian, M., Kennedy, T.W. Mixing and Compaction Temperatures for Superpave Mixes. Asphalt Paving Technology, Vol.69, pp34-71, 2001.
- Khatri, A., Bahia, H.U., Hanson, D. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyrotory Compactor. Asphalt Paving Technology, Vol.70, pp368-402, 2001.
- Anderson, D., Le Hir, Y., Planche, J.P., Martin, D. Zero Shear Viscosity of Asphalt Binders. Transportation Research Board Annual Congress, Washington, paper (02-4113), 2002.
- Desmazes, C., Lecomte, M., Lesueur, D., Philips, M. 2nd Euraphalt and Eurobitume Congress, pp203, 2000.
- Cross, M.M. Rheology of Non-Newtonian fluids: a New Flow Equation for Pseudo-plastic Systems. Journal of Colloidal Science, Vol.20, pp 417-437, 1965.
- Ostwald, W. Kolloid Z., Vol.36, pp 99, 1925.
- De Kee, D. Equations rheologiques pour decrise le comportement des fluides Polymeriques. Ph.D. Thesis. Ecole polytechnique, Montreal, QC, Canada, 1977.
- Yasuda, C. Investigation of the analogies between viscometric and linear viscoelastic properties of polystyrene fluids. Ph.D.Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1979.

ENERGÍA UTILIZADA EN LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS. UTILIZACIÓN DEL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PARA EVALUAR LA COMPACTABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Ing. Rosana G. Marcozzi

En los últimos años se ha incrementado notablemente el uso de mezclas asfálticas con ligantes modificados con polímeros en la construcción de pavimentos de altas prestaciones y en pavimentos de alta velocidad. Estos asfaltos proveen al pavimento elevada resistencia al ahuellamiento y a la fatiga, muy buena adherencia pavimento-neumático y gran durabilidad.

Sin embargo, los asfaltos modificados con polímeros presentan mayor consistencia, lo que hace que las temperaturas necesarias para obtener las viscosidades establecidas para los procesos de mezclado y compactación sean bastante superiores a las utilizadas en asfaltos convencionales.

Estas temperaturas se consideran excesivas, tanto desde el punto de vista técnico (degradación del polímero, envejecimiento prematuro del asfalto base), desde el punto de vista de la seguridad laboral y, especialmente en estos últimos años, desde el punto de vista ambiental (elevado consumo de recursos no renovables, emisiones).

En la búsqueda de un uso más racional de la energía utilizada en los procesos constructivos la tendencia actual es reducir obligadamente las temperaturas de trabajo, lo que nos lleva a cuestionar en esta etapa en qué medida esto puede afectar los procesos de compactación en obra.

En este trabajo se evalúa la resistencia a la compactación de las mezclas asfálticas a través de un nuevo parámetro utilizando el compactador giratorio Superpave, que densifica en laboratorio bajo condiciones similares a las de obra.

Los objetivos del trabajo han sido, en primer lugar, verificar la capacidad de los parámetros asociados con la compactación para caracterizar la resistencia que presentan las mezclas a ser compactadas, obteniendo así valores de resistencia a la compactación de mezclas locales y, en segundo lugar, utilizar este parámetro para relevar diferencias en la compactabilidad de mezclas fabricadas a menores temperaturas que las temperaturas recomendadas por rango de viscosidad.

Efectivamente se comprueba que mezclas realizadas con asfaltos modificados con polímeros pueden densificarse a temperaturas inferiores a las recomendadas con el mismo esfuerzo de compactación sin variar significativamente la resistencia que presentan al ser compactadas, lo que significaría un importante ahorro de la energía utilizada en su fabricación.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de polímeros a los asfaltos ha marcado una inflexión en el diseño de mezclas asfálticas. Por sus características los polímeros incorporados al asfalto han permitido la realización de mezclas asfálticas de mayores resistencias al ahuellamiento y a la fatiga y mayor durabilidad.

Pero existe en la actualidad la certeza de que la utilización de las viscosidades recomendadas para mezclado y compactación de mezclas asfálticas [1] [2] altera la calidad del polímero y principalmente al asfalto base, por lo que la solución técnica ha sido disminuir las temperaturas de trabajo cuando se utilizan asfaltos modificados con polímeros y también cuando se utilizan algunos asfaltos especiales.

Los criterios empleados para ello están basados en teorías independientes y asociados a dos grandes líneas de investigación: el concepto de viscosidad a corte cero (ZSV) [3], que es el que utilizaremos en este trabajo, y el concepto de energía de activación [4].

El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar en qué medida se ve afectada la compactabilidad de las mezclas, medidas con un parámetro asociado con el compactador giratorio Superpave, cuando se reducen las temperaturas de fabricación.

COMPACTACIÓN MEDIANTE EL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE

El compactador giratorio densifica mezclas asfálticas a través de un esfuerzo de corte tratando de simular las

condiciones en las que la mezcla es construida en obra. Permite variar las energías de compactación mediante las variaciones de presión de carga, ángulo de inclinación, velocidad de giro y número de giros.

Las condiciones de compactación utilizadas en el sistema de diseño Superpave son las siguientes: el pistón de carga aplica 600 kPa de presión y el molde es inclinado 1.25 grados respecto de la vertical antes de iniciar el giro de su base a 30 r.p.m.

Mediante sensores ópticos se miden y registran las alturas de la probeta para cada número de giro. Esto permite el seguimiento de la densificación durante todo el proceso de compactación.

RESISTENCIA A LA COMPACTACIÓN

Las mezclas asfálticas presentan diferentes resistencias frente al proceso de compactación en obra. Esta resistencia a ser compactada es una medida de la energía necesaria para densificar una mezcla.

En el año 1998 se propuso el uso de la curva de densificación para calcular parámetros relacionados con las etapas de construcción y servicio de los pavimentos [5]. En el año 2000, Bahía y otros desarrollaron un mecanismo para incluir la medición de las fuerzas involucradas en la compactación y, más recientemente, la utilización del mismo para estimar las tensiones de corte desarrolladas. [6]

En resumen, dichas investigaciones proponen diferentes parámetros para evaluar la resistencia que presentan las mezclas al ser compactadas, como ser:

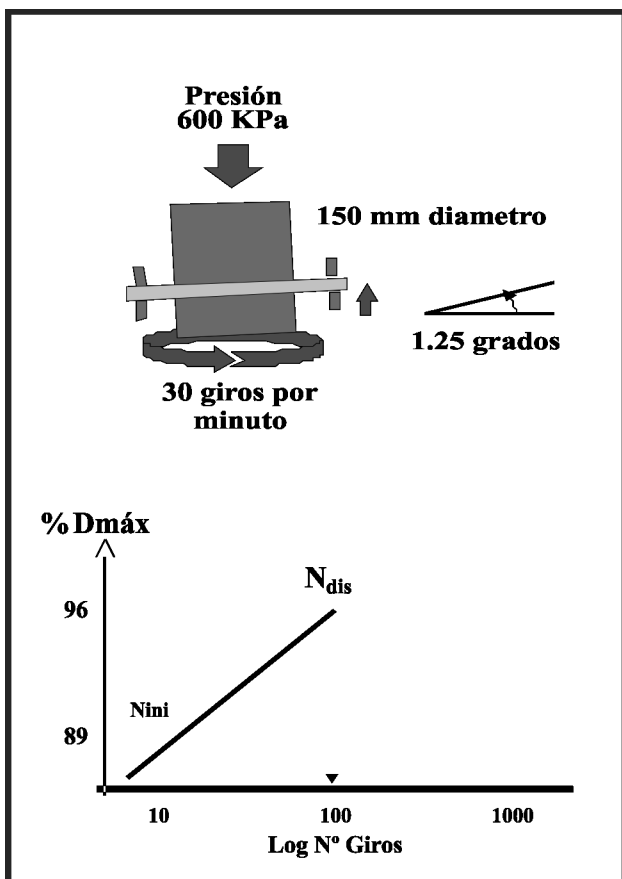


Gráfico 1. Esquema de compactación giratoria y curva de densificación.



Gráfico 2. Compactador giratorio Superpave. Detalle del proceso de compactación.

Índice de densificación durante la compactación (cdi)

Es el área bajo la curva de compactación entre el número inicial de giros definido en las especificaciones en función del nivel de tráfico y el 8 % de vacíos en la mezcla (92% Drice).

Índice de fuerzas durante la compactación (cfi)

Es el área bajo la curva de esfuerzo de corte vs número de giros entre número inicial de giros y el número de giros para el cual se obtienen un 8% de vacíos en la mezcla (92% Drice). Se requiere la medición de las fuerzas verticales durante la compactación y el uso de ecuaciones para la determinación de los esfuerzos de corte correspondientes.

También existen parámetros para evaluar la energía de compactación midiendo el trabajo vertical realizado por el equipo para disminuir la altura de las probetas. Requiere asimismo la medición de las fuerzas verticales.

Según Bahía y otros [6] los parámetros CDI y CFI tienen una gran correlación entre sí lo que permite usar al CDI como primera estimación de la resistencia a la compactación que presentan las mezclas.

TRABAJO EXPERIMENTAL PLANTEADO

El trabajo consta de dos partes. En la primera el objetivo fue verificar la capacidad del parámetro CDI para caracterizar la resistencia a compactación de mezclas de distintas granulometrías, con agregados de distinto origen y distintos tipos de asfaltos.

En la segunda parte se determinan los valores de CDI en mezclas asfálticas fabricadas a temperaturas reducidas.

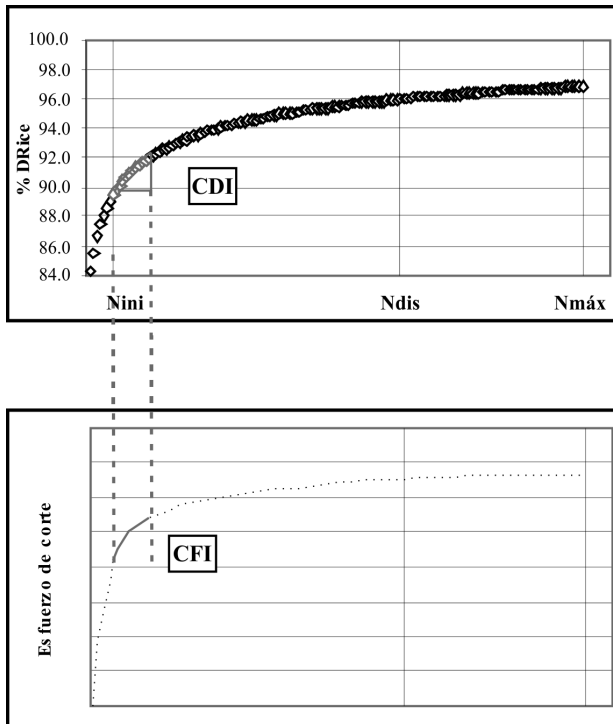


Gráfico 3. Áreas involucradas en la determinación de los parámetros CDI y CFI.

Considerando las especificaciones locales para la compactación, en el presente trabajo se propuso además la determinación de las áreas bajo las curvas de densificación desde el inicio de la compactación hasta alcanzar el porcentaje de vacíos de diseño especificado para cada tipo de mezcla.

PRIMERA PARTE: MEDICIÓN DE CDI

Las variables estudiadas fueron las siguientes:

- Granulometrías: mezclas de granulometría fina F, media M y gruesa G.
- Agregado: agregados 1, 2 y 3.
- Asfalto: dos asfaltos convencionales, CA20 y CA30, dos asfaltos modificados con polímeros, AMP 1 (EVA), AMP 2 (SBS).

En todos los casos las temperaturas de mezclado y compactación se corresponden con las de viscosidades de 0.17 y 0.28 Pa.s, respectivamente.

Resultados

Se presentan en las siguientes tablas los valores medios de las muestras analizadas para cada variable.

El Gráfico 4 muestran los efectos de la granulometría, el tipo de agregado y el tipo de asfalto en la energía necesaria para densificar las mezclas. Las columnas representan los valores medios del parámetro “Área N_1-N_{dis} ” (eje de ordenadas a la izquierda) y los marcadores, los valores medios del parámetro CDI (eje de ordenadas a la derecha).

Tabla 1. Valores de parámetros CDI y Área N_1-N_{dis} para el Agregado 1

	MEZCLA	F CA 20	M CA 20	G CA 20	G AMP1	G AMP2
CDI	μ	9.9	27.6	57.5	67.3	64.3
	σ	2.0	3.1	4.5	2.3	0.4
AREA $N_1 - N_{dis}$	μ	864.9	1017.3	1138.0	1183.8	1211.5
	σ	48.7	49.2	36.3	14.0	55.7

μ : Valor medio

σ : desvío estándar

Tabla 2. Valores de parámetros CDI y Área N_1-N_{dis} para el Agregado 2.

	MEZCLA	F CA 20	M CA 20	G CA 20
CDI	μ	18.3	33.4	52.5
	σ	2.5	3.2	4.0
AREA $N_1 - N_{dis}$	μ	888.0	1042.7	1051.8
	σ	44.5	50.0	48.2

Tabla 3. Valores de parámetros CDI y Área N_1-N_{dis} para el Agregado 3.

	MEZCLA	F CA 20	M CA 20	G CA 20	G CA 30	G AMP1	G AMP2
CDI	μ	14.2	29.7	52.3	48.0	50.2	52.4
	σ	1.9	2.6	4.8	4.7	3.4	2.2
AREA $N_1 - N_{dis}$	μ	862.8	998.2	1083.6	1059.1	1097.8	1083.5
	σ	23.4	29.0	20.3	28.8	14.1	15.6

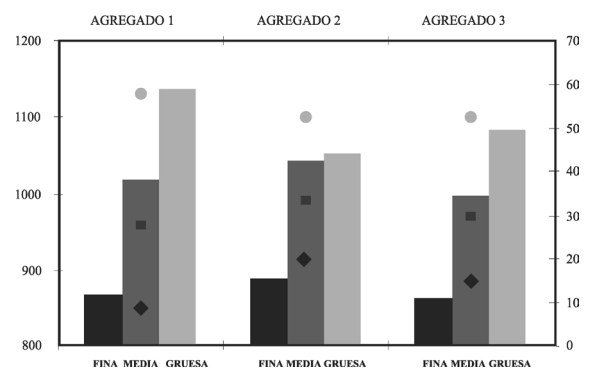


Gráfico 4. Efecto del cambio de granulometría en los parámetros de densificación de mezclas con asfalto CA20.

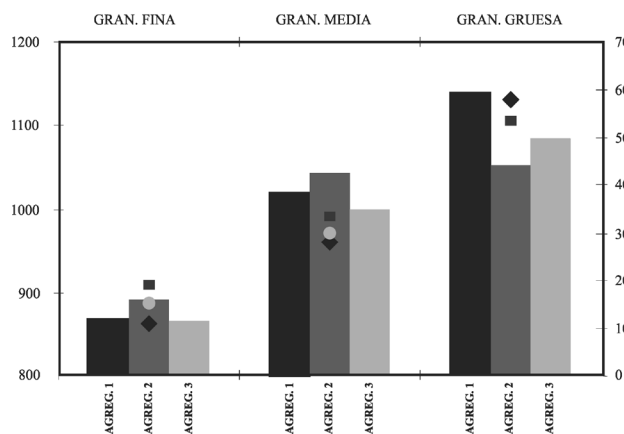


Gráfico 5. Efecto del cambio de agregado en los parámetros de densificación de mezclas con asfalto CA2.

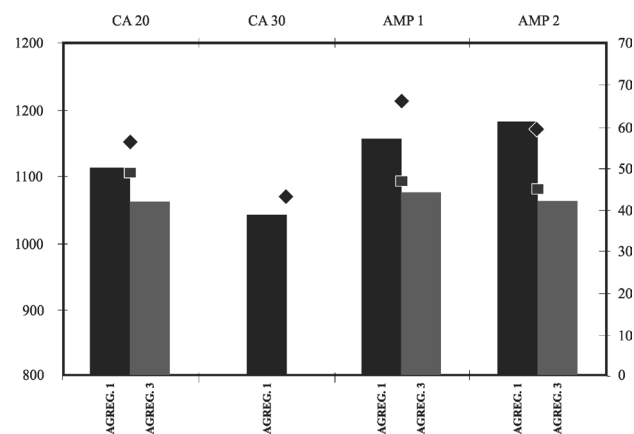


Gráfico 6. Efecto del cambio de ligante en los parámetros de densificación en mezclas de granulometría gruesa (G).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Tabla 4. Análisis de medias del parámetro CDI

	GRANULOMETRÍA	TIPO DE AGREGADO	TIPO DE ASFALTO
FINA		SI	x
MEDIA		SI	x
GRUESA		SI	SI
AGREGADO 1	SI		SI
AGREGADO 2	SI		x
AGREGADO 3	SI		NO
CA-20	SI	SI	
CA-30	X	X	
EVA	X	SI	
SBS	X	SI	

Tabla 5. Análisis de medias del parámetro Area N_1-N_{dis}

	GRANULOMETRÍA	TIPO DE AGREGADO	TIPO DE ASFALTO
FINA		NO	x
MEDIA		NO	x
GRUESA		SI	SI
AGREGADO 1	SI		NO
AGREGADO 2	SI		x
AGREGADO 3	SI		NO
CA-20	SI	SI	
CA-30	X	X	
EVA	X	SI	
SBS	X	NO	

SI: hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las distintas variables a un nivel de confianza del 95 %.

NO: no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las distintas variables a un nivel de confianza del 95 %.

Si bien los parámetros analizados tienen una fuerte correlación entre sí el análisis estadístico muestra que no en todos los casos tienen similar capacidad para evaluar una misma variable.

- El parámetro CDI permite diferenciar granulometrías, presentando las mezclas finas menores resistencias a la compactación que las mezclas de granulometrías media y gruesa.

- Cuando se analiza la resistencia presentada hasta alcanzar la compactación de diseño puede afirmarse que para las mezclas de granulometría fina el origen del agregado utilizado no afecta significativamente la compactabilidad, teniendo presente que en nuestro caso los agregados finos cumplen similares requisitos de angularidad.

- A su vez, se pone de manifiesto que mezclas con una misma curva granulométrica gruesa pueden requerir diferentes energías para lograr una misma densidad. En nuestro caso la diferencia de textura superficial de los agregados gruesos de diferentes orígenes necesariamente afecta la energía necesaria para densificar.

- Para analizar la influencia del tipo de asfalto se utilizó la granulometría gruesa y el contenido óptimo de asfalto. Para el agregado 3 no se presentan diferencias significativas entre las resistencias a la compactación de las mezclas realizadas con distintos tipos de asfalto. En las mezclas con el agregado 1 si hay diferencias significativas, especialmente en las fabricadas con asfaltos modificados. Esta diferencia de comportamiento permite confirmar que el criterio de equiviscosidad del ligante no es suficiente para garantizar un mismo nivel de densificación en obra.

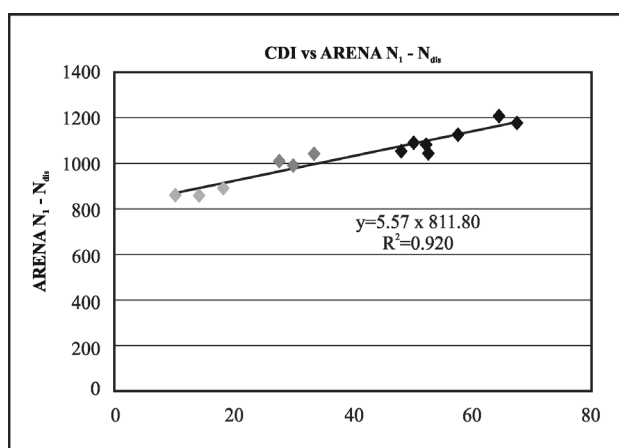


Gráfico 7. Relación entre los parámetros analizado.

SEGUNDA PARTE: EVALUACIÓN DE LA COMPACTABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS A TEMPERATURAS REDUCIDAS

Los parámetros analizados en la primera parte de este trabajo resultan adecuados para comparar las energías necesarias para la densificación de mezclas con diferentes granulometrías, diferentes tipos de agregados o diferentes tipos de cementos asfálticos. En esta segunda parte del trabajo se medirán los CDI de mezclas con distintas temperaturas de fabricación para determinar si existen cambios significativos en las energías necesarias para densificarlas.

Las temperaturas de fabricación utilizadas fueron:

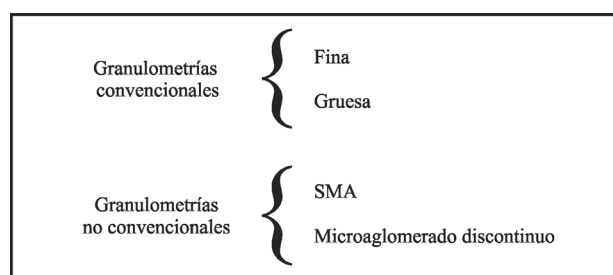
- Temperaturas de mezclado y compactación T1: correspondientes a los rangos de equiviscosidades recomendados por el Asphalt Institute [1] [2], con valores medios de 0.17 y 0.28 Pa.s, respectivamente y que representan la referencia en nuestro país.

- Temperaturas de mezclado y compactación T2: correspondientes a la simplificación propuesta por Bahía [3] según el concepto de Viscosidad a Corte Cero. Viscosidades de 0.75 y 1.40 Pa.s para mezclado y compactación, respectivamente, medidas en viscosímetro rotacional según ASTM D4402 a una velocidad de rotación de 20 rpm y spindle N° 27.

- Temperaturas de mezclado y compactación T3: temperaturas obtenidas por extrapolación de datos de mediciones realizadas a diferentes temperaturas y velocidades de corte mediante el viscosímetro rotacional [7] (según el concepto de Viscosidad a Corte Cero y siguiendo el modelo de Zeng).

Se analizaron los efectos de los distintos rangos de temperaturas en mezclas de granulometrías fina y gruesa, con agregados provenientes de trituración, es decir, sin el aporte de arena natural.

También se presentan los datos obtenidos al evaluar compactabilidad en una mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt) y un MAC (Microconcreto asfáltico en caliente) discontinuo, ambas diseñadas para ser utilizadas en tramos experimentales.



MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA CONVENCIONAL

Las mezclas diseñadas tienen una energía de compactación de 100 giros (Ndis), no contienen arena natural y tienen granulometrías fina y gruesa, según Gráfico 8.

El asfalto utilizado es un asfalto modificado con polímero SBS cuyas temperaturas analizadas se presentan en la siguiente tabla 6.

En la tabla 7 se presentan los valores medios de los parámetros en análisis para los tres niveles de temperaturas, correspondientes a la clasificación de la tabla anterior.

Mediante el análisis de los valores obtenidos en tres probetas para cada rango de temperaturas analizadas se concluye que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios para un nivel de confianza de 95 %, tanto en la mezcla de granulometría fina como en la de granulometría gruesa.

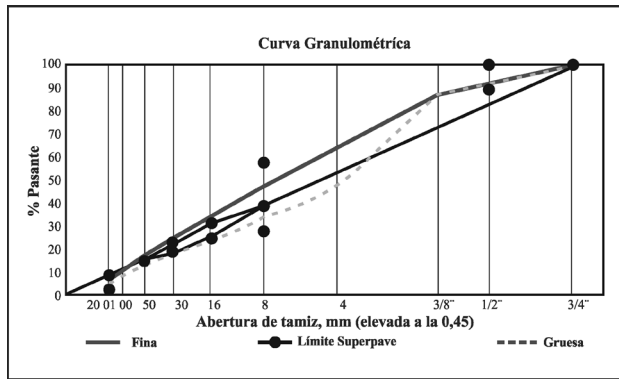


Gráfico 8. Curvas granulométricas de mezclas friccionales

Tabla 6. Temperaturas de mezclado y compactación

	Asphalt Institute	Simplificación de BAHIA	ZSV (Zeng)
T° mezclado [°C]	179	158	148
Viscosidad [Pa.s]	0.17	0.73	1.6
T° compactación [°C]	172	149	141
Viscosidad [Pa.s]	0.28	1.6	3.1

Tablas 7. Parámetros de construcción para los tres rangos de temperatura.

MEZCLA: FINA, $N_{dis} = 100$
 ASFALTO: AM3

Temperaturas de compactación	Valor medio de CDI	σ CDI	Valor medio del Área $N_1 - N_{dis}$	σ Área $N_1 - N_{dis}$
A.I. (T1)	47.4	4.9	1111.3	37.1
SIMPLIFICACIÓN DE BAHIA (T2)	41.3	3.2	1110.8	32.3
ZVS (ZENG) (T3)	46.7	2.4	1093.9	42.2

MEZCLA: GRUESA, $N_{dis} = 100$
 ASFALTO: AM3

Temperaturas de compactación	Valor medio de CDI	σ CDI	Valor medio del Área $N_1 - N_{dis}$	σ Área $N_1 - N_{dis}$
A.I. (T1)	83.9	2.7	1250.2	48.1
SIMPLIFICACIÓN DE BAHIA (T2)	77.7	6.2	1251.7	50.2
ZVS (ZENG) (T3)	81.6	2.1	1232.4	47.0

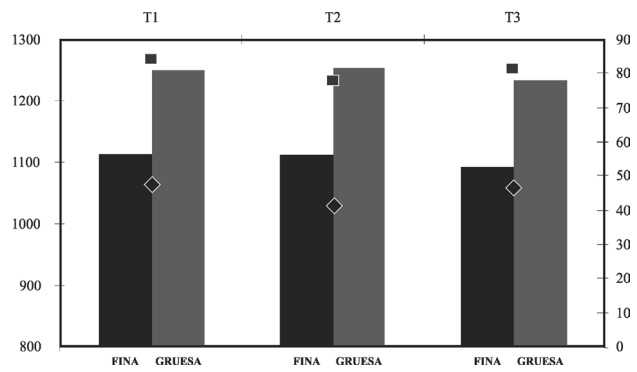


Gráfico 9. Efecto de las diferentes temperaturas de trabajo sobre los parámetros de densificación.

Si bien las energías obtenidas son similares, resulta adecuado mostrar que las densidades se encuentran también en el mismo orden de magnitud. Para tres niveles de compactación, se comparan las densidades de probetas fabricadas a temperaturas reducidas con las densidades correspondientes a las fabricadas con la temperatura T1. Los resultados se presentan en la tabla 8.

El análisis de los valores medidos de densidades en los tres juegos de probetas realizados para los tres niveles de compactación indican que, tanto para las mezclas gruesas como para las mezclas finas, no hay diferencias estadísticamente significativas para las medias ni para las desviaciones típicas en un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 8: Variación de las densidades para los tres rangos de temperatura.

MEZCLA: FINA $N_d = 100$
 ASFALTO: AM3

Número de giros	% D(T2) D(T1)	% D(T3) D(T1)
50	100.6	100.5
100	99.5	99.6
150	100.0	99.5

MEZCLA: GRUESA $N_d = 100$
 ASFALTO: AM3

Número de giros	% D(T2) D(T1)	% D(T3) D(T1)
50	99.7	99.5
100	99.7	97.7
150	100.2	100.5

D(Ti): densidad de un juego de probetas realizadas a las temperaturas del rango i

MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA NO CONVENCIONAL

Las mezclas diseñadas para tramos experimentales con un $N_{dis} = 100$, son del tipo SMA y MAC discontinuo.

Para la mezcla SMA se utilizó el mismo asfalto cuyos rangos de temperatura se indican en la tabla 6.

Para el microaglomerado discontinuo se utilizó otro asfalto del tipo AM3, con el rangos de temperatura que marca la tabla 9.

Para este asfalto las temperaturas definidas por la simplificación de Bahía y las obtenidas por la extrapolación de Zen prácticamente coinciden.

En la tabla 10 se presentan los resultados de los parámetros en análisis para las temperaturas T1, T2 y T3, correspondientes a la clasificación de las tablas 6 y 9 para SMA y microaglomerado, respectivamente.

Tabla 9. Temperaturas de mezclado y compactación. Asfalto AM3. Micro.

	Asphalt Institute (T1)	BAHIA 20 rpm (T2)	[τ]	ZSV (Zeng) (T3)
T° mezclado [°C]	179	152		≈ 148
Viscosidad [Pa.s]	0.17	0.7		≈ 0.9
T° compactación [°C]	172	142		≈ 141
Viscosidad [Pa.s]	0.28	1.4		1.4

Tablas 10. Parámetros de construcción para los tres rangos de temperatura.

MEZCLA: SMA, $N_{dis} = 100$
ASFALTO: AM3 (Tabla 6)

Temperaturas de compactación	Valor medio de CDI	σ CDI	Valor medio del Área $N_1 - N_{dis}$	σ Área $N_1 - N_{dis}$
A.I. (T1)	70.3	0.7	1373.2	45.2
SIMPLIFICACIÓN DE BAHIA (T2)	68.6	3.5	1451.8	43.2
ZVS (ZENG) (T3)	63.9	2.8	1404.0	48.1

MEZCLA: MAC discontinuo, $N_{dis} = 100$
ASFALTO: AM3 (Tabla 9)

Temperaturas de compactación	Valor medio de CDI	σ CDI	Valor medio del Área $N_1 - N_{dis}$	σ Área $N_1 - N_{dis}$
A.I. (T1)	264.9	7.8	1269.3	51.1
SIMPLIFICACIÓN DE BAHIA (T2)	265.5	9.7	1280.5	53.0

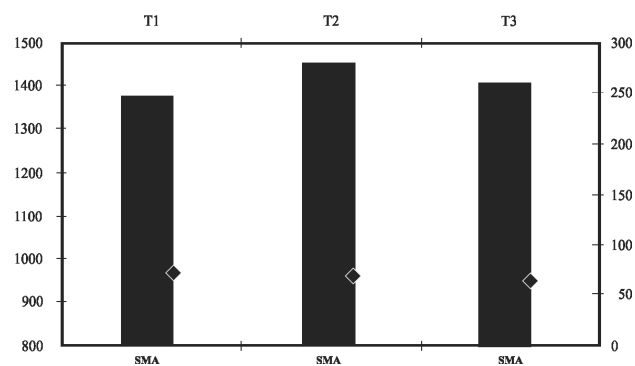


Gráfico 10. Efecto de las diferentes temperaturas de trabajo sobre los parámetros de densificación en mezcla tipo SMA

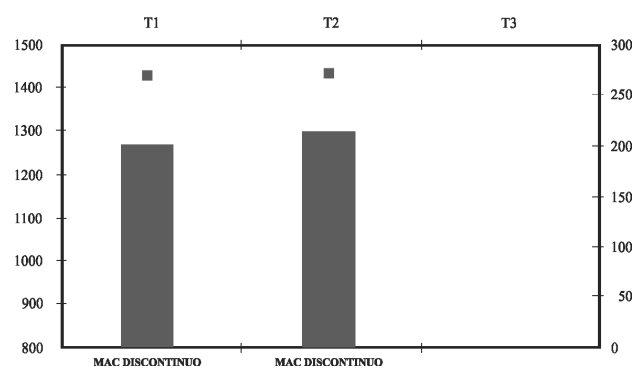


Gráfico 11. Efecto de las diferentes temperaturas de trabajo sobre los parámetros de densificación en mezcla tipo MAC DISCONTINUO.

Nuevamente se confirma que las temperaturas de mezclado y compactación no afectan los valores de los parámetros de construcción en forma estadísticamente significativa.

También se compararon densidades de probetas fabricadas a temperaturas reducidas con las densidades correspondientes a las fabricadas con la temperatura T1. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tablas 11. Variación de las densidades. Mezclas no convencionales.

MEZCLA: SMA $N_d = 100$ **ASFALTO:** AM3 (Tabla 6)

Número de giros	% D(T2) D(T1)	% D(T3) D(T1)
50	100.7	101.3
100	96.1	97.1
150	98.9	100.7

MEZCLA: MICROAGLOMERADO $N_d = 100$
ASFALTO: AM3 (Tabla 9)

Número de giros	% D(T2) D(T1)	% D(T3) D(T1)
50	99.0	----
100	98.8	----
150	99.4	----

D(Ti): densidad de un juego de probetas realizadas a las temperaturas del rango i

El análisis de los valores medidos de densidades en los tres juegos de probetas realizados para los tres niveles de compactación indica que para las dos mezclas no convencionales estudiadas no hay diferencias estadísticamente significativas para las medias ni para las desviaciones típicas en un nivel de confianza del 95 %.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluaron las resistencias que presentan las mezclas a ser compactadas mediante parámetros de construcción definidos como áreas bajo la curva de densificación en el compactador giratorio Superpave.

Puede afirmarse de acuerdo al análisis de los resultados que:

- Cuando las mezclas analizadas tienen el mismo orden de angularidad de agregados finos, las mezclas finas presentan menores resistencias a ser compactadas que las mezclas de granulometría media. A su vez estas últimas presentan menores resistencias a la compactación que las mezclas de granulometría gruesa.
- Cuando las mezclas analizadas tienen la misma granulometría fina y el contenido óptimo de un mismo tipo de asfalto puede considerarse que el origen del agregado no afecta significativamente la compactabilidad, siempre que los agregados finos tengan similares valores de angularidad.
- En el caso analizado, las mezclas gruesas pueden requerir distintas energías para lograr una misma densidad cuando se utilizan agregados de diferentes orígenes, en nuestro caso, puede atribuirse a que los agregados presentan diferencias de textura superficial, lo que necesariamente influye en su compactabilidad.
- Tanto en las mezclas de granulometrías convencionales como en las de granulometrías no convencionales la disminución de las temperaturas de mezclado y compactación no afectan los valores de los parámetros en forma significativa.

BIBLIOGRAFÍA

- Asphalt Institute Series N° 2 (MS-2), Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot – mix Types.
- Asphalt Institute Series N° 2 (SP-2), Superpave Mlevel 1 Mix Design
- Khatri, Bahía and Hanson. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyratory Compactor. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 368 -401, Marzo 2001.
- Salomón Cué, Huachun Zhai Cui. Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes bituminosos. Memorias del XII° CILA, Quito, Ecuador, Noviembre 2003.
- Bahía, Friemel, Peterson and Russell. Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 189-233, Marzo 1998.
- Bahía, Masad, Stakston, Dessouky, Bayomy. Simplistic Mixture Design Using the SGC and the DSR. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, pp. 196-225, Marzo 2003.
- Fernández, Agnusdei, Iosco. Temperaturas óptimas de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos modificados. Memorias del XII° CILA, Quito, Ecuador, Noviembre 2003.

- Se obtuvieron valores de estos parámetros para materiales locales. Todos los casos analizados dieron valores de CDI menores que 300, valor propuesto por Bahía como límite superior [5].

- Se comprueba efectivamente que mezclas realizadas con asfaltos modificados con polímeros pueden compactarse a temperaturas inferiores con el mismo esfuerzo sin variar significativamente la resistencia que presentan al ser compactadas.

Esta última conclusión confirma que las altas temperaturas utilizadas en la fabricación de mezclas con asfaltos modificados no son necesarias para obtener la densificación deseada y que es posible optimizar el consumo de energía en la fabricación de pavimentos de calidad superior.

DISCUSIÓN

La práctica en la construcción de mezclas asfálticas ha indicado históricamente que es necesario realizarla con el ligante en condiciones de baja viscosidad ya que de otra manera (disminución de las temperaturas de trabajo) no se consiguen ni un mezclado efectivo de los agregados con el asfalto ni la densidad de diseño en obra.

Actualmente existe la certeza de que estas bajas viscosidades en asfaltos modificados se obtienen con temperaturas tan elevadas que alteran la calidad del polímero degradándolo y principalmente, envejecen en forma prematura al asfalto base.

Debido al comportamiento no newtoniano de los asfaltos modificados resulta posible obtener parámetros volumétricos (densidad, vacíos) del mismo orden cuando se fabrican las mezclas a temperaturas definidas por bajas viscosidades o cuando se utilizan temperaturas un poco inferiores.

Ahora bien, si bien ha sido demostrado que es posible densificar con temperaturas reducidas, es necesario además verificar si los parámetros mecánicos y de durabilidad de las mezclas fabricadas a temperaturas reducidas se ven afectados, lo que será objeto de futuras investigaciones.

OPTIMIZACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN EN LABORATORIO Y EN PLANTA MEDIANTE EL CONCEPTO DE VISCOSIDAD DE CORTE CERO

Agnusdei, J. O.; Jair, M.; Iosco, O. A.; Fernández, A. I.; López, M. A.

En este trabajo se han aplicado las recomendaciones indicadas en el estudio NCHRP 459 desarrollado por el National Cooperative Highway Research Program de los EE.UU. para el cálculo de las temperaturas de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos modificados, donde se aplica, entre otras cosas, el concepto de Viscosidad a Corte Cero (ZSV) y algunas modificaciones a los métodos actualmente empleados.

Se analizan asfaltos modificados de producción nacional con distintos polímeros, en mezclas del tipo densas, microaglomerados discontinuos y SMA.

Los resultados de laboratorio indican que es posible disminuir las temperaturas de mezclado y compactación entre 15 y 20°C y en algunos casos más, de las que normalmente se aplican empleando las pautas para los asfaltos convencionales. Estos resultados se tratan de que sean avalados en pruebas de campo.

INTRODUCCION

Durante muchos años los procedimientos para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente han utilizado el concepto de temperatura de equiviscosidad para seleccionar en laboratorio las temperaturas óptimas de mezclado y compactación.

En 1962 el manual MS-2 del Asphalt Institute “Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types”, recomendaba para el procedimiento de diseño Marshall, las temperaturas de mezclado y compactación a las cuales el asfalto debe ser calentado, basadas en rangos de viscosidad Saybolt Furol, para posteriormente en 1974, cambiar a una forma más racional de medidas de viscosidad en centistokes, recomendando 170 ± 20 centistokes para la temperatura de mezclado y 280 ± 30 centistokes para la temperatura de compactación. A la fecha los mismos rangos de viscosidad han sido recomendados para el diseño de mezclas Superpave, excepto que las unidades fueron convertidas al sistema métrico en Pascal-segundos, que corresponden a $0,17 \pm 0,02$ Pa.s. y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Esto se encuentra documentado en el manual del Asphalt Institute “Superpave Mix Design (SP-2).

El propósito de utilizar las temperaturas de equiviscosidad para el mezclado y compactación en los procedimientos de diseño de mezclas, es normalizar el efecto de la viscosidad del asfalto sobre las propiedades volumétricas de la mezcla. En el caso de una planta asfáltica, la producción de mezcla asfáltica con un asfalto duro se efectúa incrementando la temperatura de mezclado hasta alcanzar el mismo grado de cobertura de los áridos que la que se obtiene con un asfalto más blando.

Las temperaturas de mezclado y compactación pueden ser obtenidas mediante el viscosímetro Brookfield de acuerdo a lo indicado por la especificación ASTM D 4402. Medidas de viscosidad a dos o más temperaturas (por ej. 135 y 160°C) son volcadas en un gráfico log-log de la viscosidad en centistokes, frente a la temperatura en °C.

Las temperaturas recomendadas obtenidas por este método son aplicadas solamente al diseño de mezclas en el laboratorio. Para las temperaturas de mezclado y compactación en el camino, el Asphalt Institute (1) recomienda establecer la temperatura mas baja de compactación que permita obtener la densidad deseada, mediante la realización de un tramo de prueba. La temperatura de compactación en obra se ve afectada, entre otros factores, por la temperatura del aire, la temperatura de la base, la velocidad del viento, la distancia de transporte de la mezcla, el espesor de la capa asfáltica, el equipo de compactación, etc.

El procedimiento descrito es válido solamente para asfaltos obtenidos en forma directa, sin ningún tipo de modificación. Para asfaltos modificados, las temperaturas de mezclado y compactación obtenidas aplicando este procedimiento pueden ser más altas que para los asfaltos convencionales, dependiendo las mismas de la cantidad y tipo de modificador. El hecho de emplear temperaturas muy elevadas puede conducir a la degradación del polímero producción de humos, etc.

Por la razón de que hasta el momento no exista un procedimiento aplicado a las mezclas con asfaltos modificados y hasta que se logre mayor experiencia al respecto, el Asphalt Institute (1) recomienda que las

Trabajo Técnico presentado en las IV° Jornadas Internacionales del Asfalto (2004)

temperaturas de mezclado sean ligeramente mas altas que las de compactación obtenidas en un tramo de prueba, pero sin superar los 170°C.

Teniendo en cuenta que los asfaltos convencionales se comportan como fluidos Newtonianos a temperaturas elevadas, del orden de las de mezclado y compactación, en los asfaltos modificados con polímeros, se observa una marcada dependencia de la viscosidad con la velocidad de fluir aún a temperaturas elevadas. Este fenómeno es conocido como pseudoplasticidad. En los fluidos pseudoplásticos la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de fluir, mientras que en los Newtonianos la misma permanece constante (2). En el grafico 1 se presenta lo dicho para distintos tipos de asfaltos.

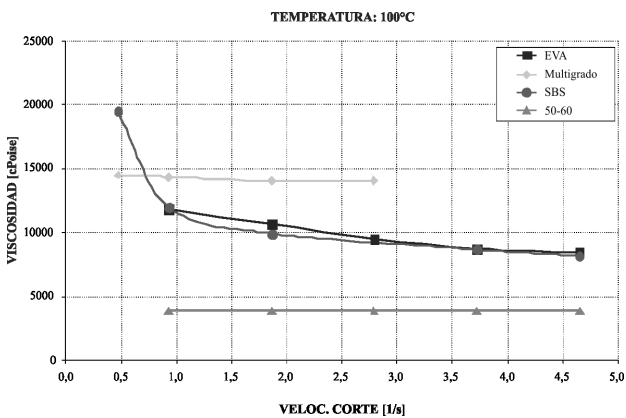


Gráfico 1: Reograma Viscosidad-Velocidad de corte de asfaltos modificados.

Varios trabajos se han llevado a cabo para estudiar qué valores de velocidad de fluir se alcanzan durante las operaciones de mezclado y compactación. Yildirim y otros (3), tratan de calcular la velocidad de fluir durante la compactación en el Compactador Giratorio (SGC) empleado en el método de diseño Superpave. Los resultados indican que las mismas son elevadas. Por otro lado Khatri y colaboradores (4), muestran para asfaltos modificados, que la compactación en el Compactador Giratorio y el mezclado en mezcladores convencionales de laboratorio, pueden ser efectuados con valores más altos de viscosidad que las empleadas corrientemente, sin que se vean afectadas las propiedades volumétricas de las mezclas. En este caso también la velocidad de fluir tiene influencia en el mezclado y la compactación.

En el informe NCHRP 459 “Characterization of Modified Asphalt Binder in Superpave Mix Design”, llevado a cabo por el National Cooperative Highway Research Program, liderado por el Dr. H. Bahía (5), se propone una metodología para el cálculo de las temperaturas de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos modificados, mediante la aplicación del concepto de viscosidad a corte cero (ZSV), ya que según él, este es el factor más importante que controla el proceso de compactación. De esta manera se logran disminuciones considerables de las temperaturas, preservando considerablemente de esta manera, las propiedades de los polímeros.

En nuestro país, si bien no hay un criterio unificado de cómo calcular las temperaturas de mezclado y compactación para el diseño de las mezclas con asfaltos modificados y su fabricación en la planta, por lo general

se sigue el mismo criterio que el empleado para los asfaltos convencionales, por lo que las temperaturas que se logran son innecesariamente elevadas. En otros casos, las temperaturas se fijan en forma empírica basada en experiencias personales o recomendaciones de las empresas fabricantes de ligantes. En los EE.UU., varios estados recomiendan no superar los 160°C, cuando se emplean ligantes modificados con SBS del tipo PG 70-28 (6).

En este trabajo se trata de aplicar la metodología propuesta en el Report 459 del NCHRP para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta de asfaltos modificados de producción nacional fabricados con distintos tipos de modificadores y empleados en diferentes mezclas bituminosas.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Metodología empleada

- Cálculo de la viscosidad a corte cero (ZSV)

Uno de los métodos que pueden seguirse para el cálculo de la viscosidad a corte cero es por extrapolación de las medidas de viscosidad a una velocidad de fluir cero, mediante modelos de viscosidad como función de la velocidad de fluir.

Cuando se trata de temperaturas mayores a 100 °C, como es nuestro caso, se pueden utilizar los modelos de Zeng y Cross-Williamson citados anteriormente. En este trabajo se escogió, por su buena correlación, el modelo de Zeng. Para las determinaciones de viscosidad se empleó un Viscosímetro rotacional Brookfield modelo (RV) DV-III, con accesorio termostático Thermosel, siguiendo las indicaciones de la especificación ASTM D 4402. Aplicando distintas velocidades de rotación las mismas se traducen en diferentes velocidades de fluir y en el caso de los asfaltos modificados, las viscosidades que se obtienen no son constantes, tal como se aprecia en el Gráfico 1.

Para realizar el ensayo, se siguen los lineamientos citados en el Apéndice III del Report 459 NCHRP para lo cual se fijó una temperatura y se comienza por la velocidad de rotación más baja posible que admite el rango del equipo, con un torque mayor a 10%. De los valores de viscosidad obtenidos, para cada determinación, se tomó el mayor. Se continuó de la misma forma para valores crecientes de la velocidad de rotación, con un tiempo de espera entre cada uno de dos minutos. Con estos pares de valores (viscosidad y velocidad de fluir) y mediante el modelo de Zeng, se determinó la viscosidad de corte cero. Se repitió el procedimiento para temperaturas de 100°C, 135°C, 150°C, 170°C y 190°C. Estos valores se representaron en gráficos de ejes coordenadas doble logaritmo de la viscosidad de corte cero en centipoises en ordenadas y el logaritmo de la temperatura en grados Kelvin en abscisas. Tomando como referencia la viscosidad a corte cero de 3,0 Pa.s y 6,0 Pa.s se calculan las respectivas temperaturas de mezclado y compactación

- Simplificaciones al método propuesto

Para evitar la complejidad de las mediciones de viscosidad a corte cero (ZSV), Bahía simplifica el procedimiento sin tener en cuenta el efecto de la velocidad de fluir, realizando

las medidas de viscosidad a una velocidad de fluir igual a 6,8 s-1 que corresponde a una velocidad de giro igual a 20 rpm con el rotor 27 del viscosímetro Brookfield, tal como lo establece el procedimiento Superpave para el cálculo de la viscosidad a 135 °C. De acuerdo a su experiencia, Bahía establece nuevas condiciones de referencia de viscosidad para esta alternativa que son 0,75 Pa.s y 1,4 Pa.s respectivamente para las viscosidades óptimas de mezclado y compactación.

- Aplicación del método convencional

Con la finalidad de poner de manifiesto las diferencias en las distintas temperaturas calculadas con los diferentes métodos, se procedió al cálculo de las temperaturas de mezclado y compactación que se lleva a cabo en forma convencional de acuerdo a lo recomendado por el Superpave Mix Design (SP-2) del Asphalt Institute.

Materiales estudiados

Se estudiaron muestras de asfaltos de producción nacional,

modificados con SBS, SBR, EVA y uno modificado químicamente denominado Multigrado. Las características de estos materiales se exponen en la Tabla 1.

Si bien los ensayos de calentamiento en película fina rotativa (RTFOT) y el de envejecimiento a presión (PAV) son de discutible aplicabilidad a los asfaltos modificados se ha querido incluirlos en esta oportunidad, con el fin de compararlos con los resultados que se obtengan durante el seguimiento de las pruebas de campo que se realicen con estos materiales

RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de las curvas de viscosidad a corte cero y de la viscosidad a 6,8 s-1 (20 rpm), en función de la temperatura, se calcularon las temperaturas de mezclado y compactación.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de temperaturas de mezclado y compactación calculados a partir de la viscosidad a corte cero (ZSV) en función de

Tabla 1: Características de los materiales estudiados.

Asfalto N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Modificador	SBS	SBR	EVA	EVA	SBS	SBS	EVA-SBR	SBS	SBS	Multigrado
Penetración A 25°C	62	54	33	69	68	66	67	60	63	47
Punto de Ablandam, °C	64,8	52,2	62,5	64,4	55,0	97,0	63,8	71,9	74,1	59,5
Recuperación Elástica Torsional, %	77	33	29	56	54	83	32	78	84	--
Ductilidad a 25°C (cm)	+150	+150	65	38	+150	122	+150	+150	117	+150
Viscosidad (2,5 s-1) cP, a :										
135 °C	2180	1090	1055	1860	800	3050	1010	4125	5250	1480
150 °C	748	553	520	750	380	1090	600	1035	1195	625
170 °C	325	260	240	390	170	350	315	390	395	265
190 °C	170	140	125	190	90	175	175	195	220	135
Sobre el residuo del RTFOT										
Recuperación Elástica Torsional, %	71	31	23	47	37	71	29	76	78	--
Viscosidad (2,5 s-1) cP, a :										
135 °C	2675	1330	1530	1720	930	4025	1205	3950	5100	3325
150 °C	1005	650	705	770	425	1320	645	1165	1315	1215
170 °C	340	290	300	335	190	400	310	420	470	460
190 °C	165	150	150	170	100	190	165	200	240	210
Sobre el residuo del PAV										
Recuperación Elástica Torsional, %	49	24	14	21	25	51	22	53	57	--
Viscosidad (2,5 s-1) cP, a :										
135 °C	2610	1870	2625	2538	1200	3650	1820	3750	5500	--
150 °C	1030	830	1130	1155	545	1345	840	1260	1625	--
170 °C	380	350	425	480	235	450	375	480	545	--
190 °C	180	175	210	240	120	200	200	215	240	--

la temperatura, para un rango de viscosidad de 3,0 Pa.s y 6,0 Pa.s y los calculados a partir de las viscosidades a 6,8 s-1 (20 rpm) (simplificación de Bahía), para 0,75 Pa.s y 1,4 Pa.s. También se incluyen las calculadas en la forma convencional para 0,17 Pa.s y 0,28 Pa.s (recomendación del Asphalt Institute).

En la totalidad de los asfaltos estudiados las temperaturas correspondientes a los límites de viscosidad de corte cero, 3 Pa.s y 6 Pa.s, son menores que las correspondientes a los requerimientos actuales de 0.17 Pa.s y 0.28 Pa.s.

En razón de que a nuestro criterio, las temperaturas calculadas con la viscosidad a corte cero nos parecieron demasiado bajas, se decidió continuar con las verificaciones de aplicabilidad de las nuevas temperaturas, con las calculadas por la simplificación realizada por Bahía por considerarlas en un principio, más racionales.

Verificaciones de laboratorio

Se prepararon mezclas del tipo densas, SMA y microaglomerados discontinuos con asfaltos modificados con EVA y SBS. Para ello se utilizó un mezclador de 20 lts de capacidad que gira a 60 RPM provisto de una paleta estática. Los tiempos de mezclado oscilaron en todos los casos, entre 30 y 40 segundos, suficientes para obtener un recubrimiento completo de los áridos. Con estas mezclas se moldearon probetas Marshall con 75 golpes por cara. Las temperaturas de mezclado y compactación fueron las calculadas por el procedimiento convencional y el simplificado por Bahía. En la Tabla 3 se indican los resultados obtenidos de las distintas mezclas.

En esta Tabla 3 el número de muestra coincide con el número de ligante modificado empleado.

Del análisis de la Tabla 3 surge que aplicando la simplificación de Bahía, las temperaturas de mezclado se ven disminuidas entre 20 y 30°C, respecto a las calculadas por el método convencional. Aún así, el recubrimiento de los agregados pétreos es excelente. Otro tanto ocurre con las temperaturas de compactación, donde las disminuciones son muy parecidas. En este caso se observa

que las densificaciones de las mezclas son del mismo orden, tal como lo indica el contenido de vacíos.

Verificaciones de campo

Con el objetivo de verificar en una operación real de campo si se podían reproducir los resultados obtenidos en el laboratorio, se llevaron a cabo dos pruebas con asfaltos modificados con SBS de distinta procedencia, en un microaglomerado F10 y una SMA-10 (Stone Mastic Asphalt). La obra donde se realizó la prueba con el microaglomerado F10 está ubicada en la Autopista 25 de Mayo en la ciudad de Buenos Aires, sentido Provincia-Capital, en el primer carril y la SMA 10 en la Autopista del Oeste, también en la ciudad de Buenos Aires, sentido Capital-Provincia en el 2° carril (lento).

El microaglomerado F10 fue fabricado con un ligante modificado con SBS tipo AM3, cuyas características corresponden al N° 8 de la Tabla 1. La mezcla SMA se fabricó con un ligante con SBS tipo AM3 cuyas características corresponden al N° 9 de la misma Tabla. Las mezclas se colocaron en un espesor de 3 cm. En la Tabla 4 se presentan las condiciones de trabajo de los tramos de prueba. En la columna de la izquierda se indican las temperaturas obtenidas de aplicar la recomendación del Asphalt Institute para asfaltos convencionales. La columna del centro indica las temperaturas a las cuales estaba trabajando normalmente la empresa y la de la derecha las temperaturas a las cuales se trabajó durante la prueba.

Las temperaturas de trabajo en el tramo de prueba coincidieron con las calculadas en el laboratorio correspondientes a viscosidades de 0.75 y 1.40 Pa.s para el mezclado y la compactación, respectivamente.

Las mezclas colocadas tanto a alta como a baja temperatura, presentaban las características indicadas en la Tabla 5.

Tal cual puede apreciarse en la Tabla 5, las características de los testigos extraídos del pavimento, correspondientes tanto al Microaglomerado como a la SMA fabricados y colocados a diferentes temperaturas, son muy similares.

Tabla 2 : Temperaturas de mezclado y compactación obtenidas por diferentes métodos.

Asfalto	Temperaturas de Mezclado [°C]			Temperaturas de Compactación [°C]		
	A. Institute	ZSV	Simplificac.*	A. Institute	ZSV	Simplificac.*
	0.17 Pa.s	3 Pa.s	0.75 Pa.s	0.28 Pa.s	6 Pa.s	1.4 Pa.s
1	175	139	155	168	133	146
2	172	122	143	162	112	131
3	175	116	142	164	106	128
4	168	117	139	159	108	127
5	155	121	133	147	114	124
6	175	145	155	168	138	146
7	170	117	140	160	105	128
8	176	148	152	168	141	142
9	188	151	158	178	145	146
10	175	---	143	165	---	131

* Simplificación realizada por Bahía.

Tabla 3 : Características de las mezclas preparadas a distintas temperaturas

Número de Muestra	Método convencional (0.17 y 0,28 Pa.s)					Método simplificado (0,75 y 1,4 Pa.s)				
	Densidad Aparente g/cm ³	Densidad Rice g/cm ³	Vacios %	Temp. Mezclado °C	Temp. Compactación, °C	Densidad Aparente g/cm ³	Densidad Rice g/cm ³	Vacios %	Temp. Mezclado °C	Temp. Compactación, °C
Mezcla Densa										
1	2,426	2,496	2,8	175	168	2,426	2,492	2,6	155	146
2	2,434	2,502	2,7	172	162	2,427	2,489	2,5	143	131
3	2,419	2,516	3,9	175	164	2,411	2,491	3,2	142	128
4	2,427	2,493	2,6	168	159	2,417	2,496	3,2	139	127
10	2,465	2,512	2,0	175	165	2,460	2,53	2,8	143	131
Microaglomerado F10										
5	2,370	2,495	5,0	155	147	2,332	2,490	6,3	133	124
6	2,351	2,487	5,5	175	168	2,339	2,495	6,2	155	146
7	2,342	2,476	5,4	173	160	2,318	2,484	6,7	154	128
9	2,328	2,491	6,5	188	178	2,329	2,486	6,3	158	146
SMA										
8	2,397	2,480	3,3	176	168	2,382	2,473	3,7	152	142

Tabla 4 : Temperaturas de trabajo en los tramos de prueba

Asphalt Institute (0.17 y 0.28 Pa.s), °C		Temperaturas medias de trabajo en obra, °C		Temperaturas medias del tramo de prueba, °C	
Mezclado	Compactación	Mezclado	Compactación	Mezclado	Compactación
Microaglomerado F 10					
188	178	180	160	158	148
SMA 10					
179	172	175	160	158	149

Tabla 5: Características de las mezclas colocadas

Microaglomerado F10				
Parámetros volumétricos	Valores medios de obra		Valores obtenidos del tramo de prueba	
	Probetas de Laboratorio	Testigos del Pavimento	Probetas de Laboratorio	Testigos del Pavimento
Densidad Aparente (g/cm ³)	2.336	2.315	2.332	2.298
Densidad Rice (g/cm ³)	2.484		2.484	
Vacios (%)	6.0	6.8	6.1	7,5

Stone Mastic Asphalt 10				
Parámetros volumétricos	Valores medios de obra		Valores obtenidos del tramo de prueba	
	Probetas de Laboratorio	Testigos del Pavimento	Probetas de Laboratorio	Testigos del Pavimento
Densidad Aparente (g/cm ³)	2.350	2,308	2.350	2.318
Densidad Rice (g/cm ³)	2.461	2,461	2.467	2.461
Vacios (%)	4.5	6,2	4.7	5.8

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha aplicado la metodología propuesta en el Reporte 459 del NCHRP para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta de asfaltos modificados de producción nacional fabricados con distintos tipos de modificadores y empleados en diferentes mezclas bituminosas.

Se han aplicado los conceptos de viscosidad a corte cero y algunas modificaciones sugeridas por los autores del Report 459, teniendo en cuenta que los asfaltos modificados se comportan como fluidos no Newtonianos aún a temperaturas elevadas, del orden de las de mezclado y compactación, donde se observa una marcada dependencia de la viscosidad con la velocidad de fluir.

Las pruebas realizadas muestran que aplicando la sugerencia de Bahía es posible disminuir en forma notoria

las temperaturas de mezclado y compactación sin afectar el recubrimiento de los agregados ni las características volumétricas de las mezclas.

Los límites de viscosidad adoptados de 0,75 Pa.s y 1,4 Pa.s, tanto para el mezclado como para la compactación parecerían ser adecuados y brindaría un modo racional para el cálculo de estas temperaturas. Tanto de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, como en las pruebas de campo surge que aún bajando la temperatura de mezclado en el orden de los 20°C y la de compactación en unos 12°C, las mezclas no ven afectadas sus características de mezclado y colocación.

De esta manera la degradación del polímero se ve disminuida, ya que las temperaturas a las que es expuesto son menores.

BIBLIOGRAFIA

- HENSLEY, J., PALMER, A., Establishing Hot Mix Asphalt Mixing and Compaction Temperatures At the Project Level, Asphalt Institute, 1998.

- AGNUSDEI, J.O., IOSCO, O.A. Comportamiento reológico de asfaltos a temperaturas elevadas. 30 Reunión Comisión Permanente del asfalto, Mar del Plata, 1998

- YILDIRIM, Y., SOLAIMANIAN, M., KENNEDY, T.W., Mixing and Compaction Temperatures for Superpave Mixes. Journal of the Asphalt Paving Technologists, pp 34-71, Vol 69, 2000.

- KHATRI, A., BAHIA, H., HANSON, D. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyratory Compactor. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 368-402, Vol 70, 2001.

- BAHIA, H.U., HANSON, D.I., ZENG, M., ZHAI, H., KHATRI, M.A., ANDERSON, R.M., "Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix design, Report 459 National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board, 2001.

- SOLOMON, D., Información personal.

MEZCLAS FABRICADAS A TEMPERATURAS REDUCIDAS Vs. MEZCLAS TIBIAS

Rosana G. Marcozzi

En la fabricación de mezclas asfálticas en caliente requerimos energía para evaporar la humedad natural del agregado y calentar áridos y asfalto para obtener la completa envuelta de los agregados. Si la temperatura de mezclado y compactación no son suficientes, la mezcla se vuelve menos trabajable, más difícil de compactar y más susceptible al deterioro prematuro, con efectos más o menos significativos en función de la reducción de temperatura alcanzada, la granulometría y tipo de mezcla, la angularidad de los áridos y el tipo y contenido de asfalto.

Debido a ello, la reducción de las temperaturas de trabajo se define en tramos de prueba y ha pasado a ser también una variable del diseño en laboratorio de las mezclas para pavimentación con asfaltos especiales.

No todos los asfaltos permiten reducciones importantes de las temperaturas, por ello en los últimos años se han desarrollado una variedad de tecnologías y metodologías que tuvieron como objetivo principal reducir temperaturas de trabajo sin afectar comportamiento y durabilidad. Esto dio origen al concepto de mezclas “semicalientes” o mezclas tibias.

El concepto de Mezclas tibias involucra a una serie de

tecnologías que permiten producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales, entre 20 y 50 °C menos que las típicas mezclas asfálticas en caliente.

Pueden aplicarse a cualquier tipología de mezcla asfáltica: continuas (con asfaltos convencionales o modificados), mezclas discontinuas, SMA, drenantes y recicladas.

En la Figura 1 se presenta esquemáticamente una clasificación de los distintos tipos de mezclas asfálticas de acuerdo a la temperatura de fabricación. Debido a las implicancias ambientales y la seguridad laboral, la clasificación por temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas se presenta actualmente en función de las energías consumidas y las correspondientes emisiones.

Según autoridades de la National Asphalt Paving Association (NAPA) de los EE.UU., dentro de los próximos 5 años las mezclas asfálticas preparadas en caliente se deberán hacer a temperaturas más bajas que las que hoy se están utilizando. Con esto se logrará atenuar el impacto ecológico que producen las actuales técnicas de preparación de mezclas asfálticas.

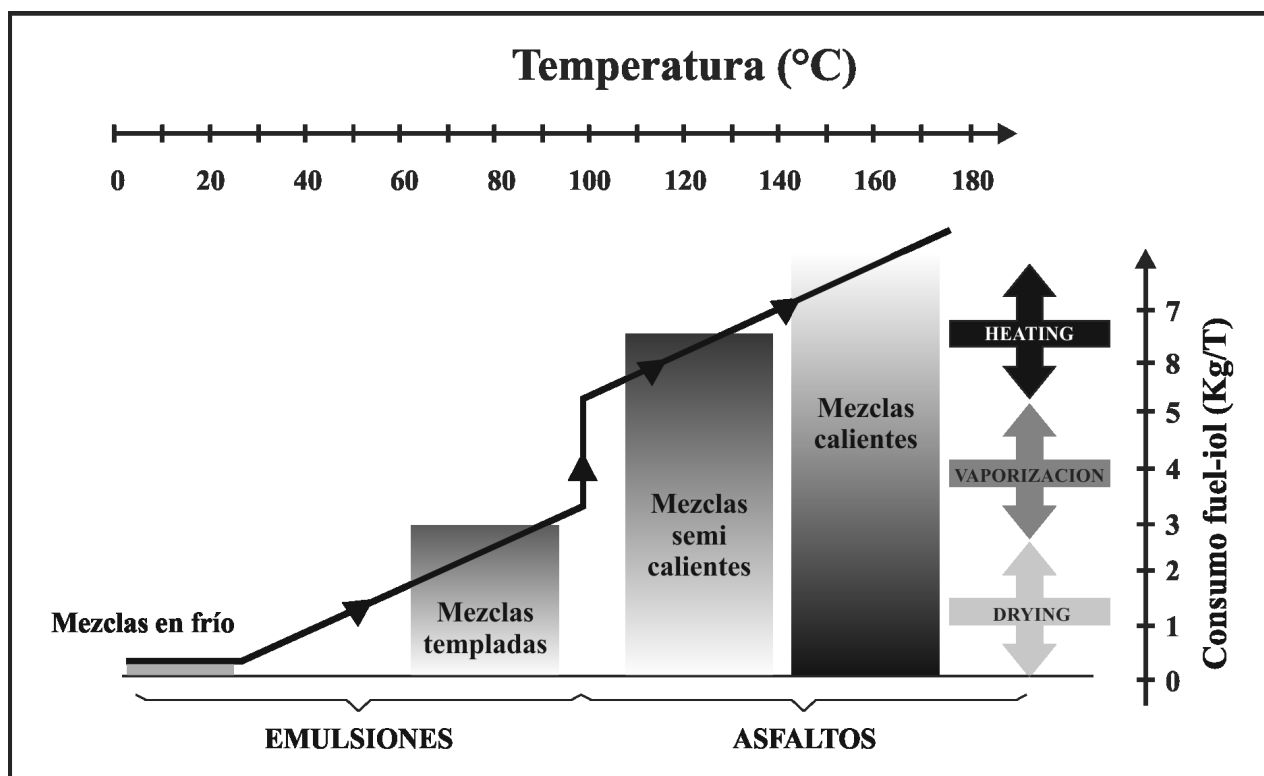


Figura 1. Clasificación de las mezclas asfálticas en función de la energía consumida en su fabricación

EFECTOS DE LA REDUCCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS EN CALIENTE – Primera Parte

Marcozzi R. G.

Las viscosidades recomendadas para los procesos de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos convencionales no son aplicables a asfaltos modificados o especiales ya que conducen a temperaturas que se consideran excesivas, tanto técnica como ambientalmente. El objetivo de este trabajo fue analizar si la disminución de las temperaturas de fabricación, asociadas históricamente con una reducción de la calidad de los pavimentos, implicaba necesariamente una degradación de las prestaciones de las mezclas cuando se utilizan asfaltos modificados o especiales.

Para ello se analizaron las respuestas de mezclas asfálticas realizadas a distintas temperaturas con la hipótesis de que los parámetros de comportamiento de los pavimentos se ven afectados significativamente por la reducción de las temperaturas de fabricación.

En esta etapa del trabajo, se concluye que los parámetros asociados a la durabilidad resultan los más sensibles para mostrar el efecto de la reducción de las temperaturas de fabricación.

INTRODUCCIÓN

Cuando se trata de mezclas asfálticas realizadas con cementos asfálticos convencionales sabemos que una disminución de las temperaturas de fabricación resulta en mezclas asfálticas de inferior calidad, mezclas que en general pueden presentar una menor vida útil.

Debido a ello la práctica en la construcción de pavimentos asfálticos especifica rangos de temperaturas resultantes de viscosidades normalizadas de fabricación.

Sin embargo, las temperaturas resultantes de las viscosidades recomendadas en Argentina para mezclado y compactación de mezclas asfálticas son muy elevadas cuando se aplican a asfaltos modificados.

Con certeza estas temperaturas elevadas alteran la calidad del polímero incorporado y principalmente al asfalto base, disminuyendo en teoría justamente las prestaciones asociadas a la incorporación de modificadores al asfalto. Como resultado de ello la tendencia ha sido encontrar la

forma de reducir las temperaturas de fabricación cuando se utilizan estos asfaltos.

Ya ha sido demostrado en laboratorio y en obra [1] [2] que es posible utilizar menores temperaturas de fabricación y obtener las mismas propiedades volumétricas de las mezclas compactadas con la misma energía de compactación.

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar los efectos sobre las propiedades mecánicas determinadas en laboratorio al disminuir las temperaturas de mezclado y compactación.

PLAN EXPERIMENTAL

Se diseñó una mezcla asfáltica de granulometría fina. Se analizaron las respuestas de mezclas asfálticas realizadas a distintas temperaturas de fabricación para evaluar si los parámetros mecánicos seleccionados se ven afectados significativamente.

En el trabajo se han utilizado asfaltos comerciales, cuatro asfaltos modificados denominados M1 (modificado con polímero del tipo SBS), asfalto M1 + AMA (M1 con aditivo amínico mejorador de adherencia), M2 (modificado químicamente) y M3 (modificado con polímero EVA) y un asfalto convencional de contraste, que se denomina CA-20 (designación en Argentina del cemento asfáltico de viscosidad a 60 °C en el orden de 2000 poises) en este texto.

MEZCLA ASFÁLTICA DISEÑADA

El agregado pétreo utilizado proviene de una misma fuente. Está integrado por piedra granítica de la zona de Olavarria, provincia de Buenos Aires, triturada en fracciones comerciales 6-20, 6-12 y 0-6.

Se diseñó una mezcla de granulometría densa con 4 % de vacíos de diseño.

La siguiente tabla indica la dosificación utilizada y la correspondiente curva (Tabla 1, Figura 1).

Trabajo Técnico presentado en el XIII° Congreso Iberoamericano del Asfalto (2005).

Tabla 1.- Dosificación de agregados.

	6-20	6-12	0-6	Asfalto
% Agr.	20	15	65	
%Agr.Mez.	19.0	14.3	61.8	5.0

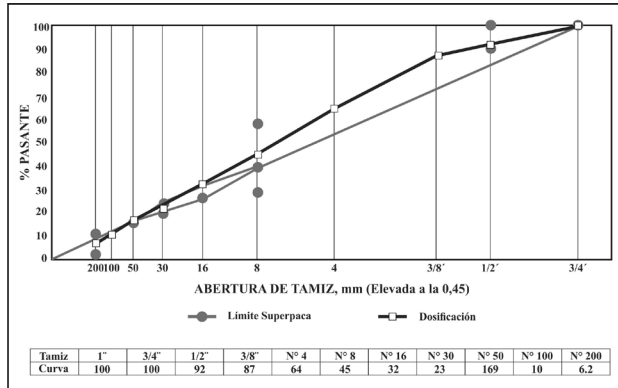


Figura 1. Curva granulométrica del diseño de agregados

TEMPERATURAS DE FABRICACIÓN

Se definen en este trabajo tres rangos de temperaturas de fabricación:

- T_1 : temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de equiviscosidades recomendados por el Asphalt Institute [3] [4], valores medios de 0.17 y 0.28 Pa.s, respectivamente.
- T_2 : temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a la simplificación propuesta por Bahía [5] según el concepto de Viscosidad a corte cero. Viscosidades de 0.75 y 1.40 Pa.s para mezclado y compactación, respectivamente, medidas en viscosímetro rotacional según ASTM D4402 a una velocidad de rotación de 20 rpm y spindle N° 27 (Viscosidad rotacional con velocidad de fluir de 6.8 l/s).
- T_3 : temperaturas de mezclado y compactación extrapoladas (no medidas) del gráfico temperatura – viscosidad para ordenadas de 3 y 6 Pa.s, respectivamente (Figura 2).

En la siguiente Tabla 2 se indican las temperaturas utilizadas.

Para T_2 todos los asfaltos modificados cumplen el límite superior de 160 °C [5].

Tabla 2. Temperaturas de fabricación.

ASFALTO	T_1 [°C]		T_2 [°C]		T_3 [°C]	
	0.17 Pa.s	0.28 Pa.s	0.75 Pa.s	1.4 Pa.s	3 Pa.s	6 Pa.s
M_1	180	171	157	149	141	134
$M_1 + AMA$	181	170	151	141	131	122
M_2	176	164	145	134	122	113
M_3	173	163	141	129	115	105
CA 20	150	139	121	111	101	92

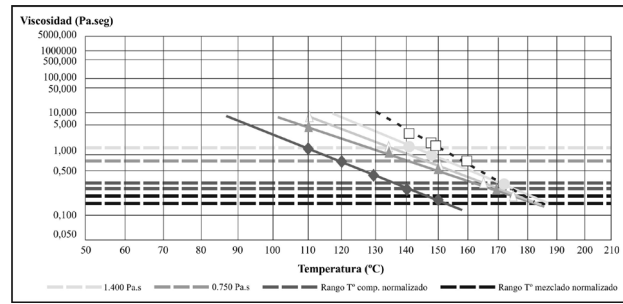


Figura 2. Relación Temperatura - Viscosidad

PARÁMETROS ANALIZADOS

Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- Estabilidad y fluencia Marshall.
- Resistencia a compresión diametral a distintas temperaturas de ensayo.
- Daño por humedad.
- Módulo de rigidez.

DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

En trabajos realizados anteriormente en nuestro laboratorio hemos comprobado que mezclas asfálticas de granulometrías convencionales y no convencionales realizadas con asfaltos modificados pueden compactarse a temperaturas inferiores a las recomendadas con el mismo esfuerzo sin variar significativamente la resistencia que presentan al ser compactadas, presentando, por tanto, propiedades volumétricas similares.

En esta ocasión se compactaron probetas para determinar estabilidad y fluencia, compresión diametral a 5, 15, 25 y 35 °C y módulo dinámico.

También se compactaron probetas con menor energía de compactación para el ensayo de daño por humedad.

En el presente trabajo se confirmó que no hay diferencias estadísticamente significativas para las medias de los valores de vacíos de los juegos de probetas realizados para cada una de las tres temperaturas de fabricación utilizadas en un nivel de confianza del 95%, tanto para las probetas destinadas para ensayos mecánicos como para las probetas destinadas a daño por humedad.

ESTABILIDAD Y FLUENCIA

En la tabla 3 se presentan los valores de las medias y las desviaciones de los ensayos de estabilidad y fluencia para cada tipo de asfalto utilizado y para cada una de las temperaturas de fabricación correspondientes.

En la casi totalidad de los asfaltos evaluados no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las estabilidades a un 95 % de confianza cuando se reducen las temperaturas de fabricación.

En general también se aprecia que las estabilidades disminuyen al reducir las temperaturas de fabricación, exceptuando el asfalto M_1 .

En la casi totalidad de los asfaltos evaluados no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las estabilidades a un 95 % de confianza cuando se reducen las temperaturas de fabricación, si bien se aprecia que las estabilidades disminuyen al reducir las temperaturas de fabricación, con excepción de las mezclas con el asfalto M_1 .

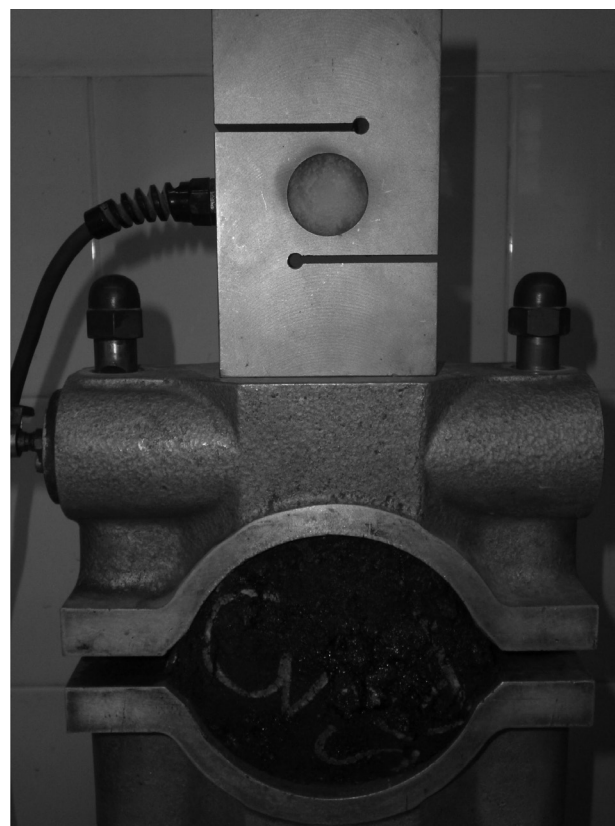


Figura 3. Ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall.

Tabla 3.- Estabilidad y fluencia para distintas temperaturas de fabricación.

	ESTABILIDAD [Kg]		FLUENCIA [mm]	
	Valores Medios	Desviación típica	Valores Medios	Desviación típica
ASFALTO M_1				
T_1	2034	148.5	4.1	0.35
T_2	1998	39.6	3.7	0.25
T_3	2092	112.3	4.0	0.28
DIF. SIGNIF.	NO	NO	---	---
ASFALTO M_1 + ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA				
T_1	2328	207.2	3.8	0.14
T_2	1910	224.2	4.5	0.14
T_3	2024	71.4	3.4	0.14
DIF. SIGNIF.	NO	NO	SI	NO
ASFALTO M_2				
T_1	2694	17.0	2.85	0.21
T_2	2225	19.8	3.45	0.35
T_3	2079	43.8	3.60	0.42
DIF. SIGNIF.	SI	NO	---	---
ASFALTO M_3				
T_1	2062	170.4	3.2	0.35
T_2	1759	117.4	2.9	0.71
T_3	1540	135.0	2.9	0.14
DIF. SIGNIF.	NO	NO	NO	NO
ASFALTO CONVENCIONAL CA-20				
T_1	1787	117.4	2.1	0.56
T_2	1476	117.4	2.5	0.07
T_3	1380	94.8	2.6	0.07
DIF. SIGNIF.	NO	NO	---	---

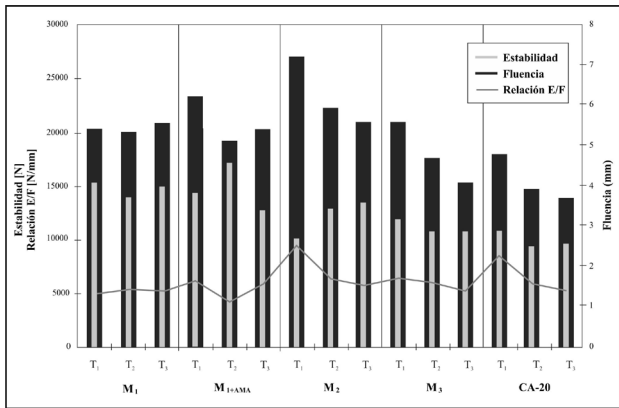


Figura 4. Variación de los parámetros Marshall con las temperaturas de fabricación.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAMETRAL

Para evaluar el parámetro mecánico Tracción Indirecta por medio de la compresión diametral las temperaturas de ensayo se establecieron en 5, 15, 25 y 35 °C.

El comportamiento de la mezcla asfáltica es fuertemente dependiente de la temperatura de ensayo. En el ensayo de tracción indirecta se manifiesta especialmente a través del tipo de rotura que se presenta:

- Si la mezcla se comporta como un sólido viscoelástico, la resistencia a la tracción se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la cohesión del mástic y la adherencia asfalto – agregado.
- Si la mezcla se comporta como un sólido elástico, su resistencia se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la dureza de los agregados y con cantidad y calidad del mástic.

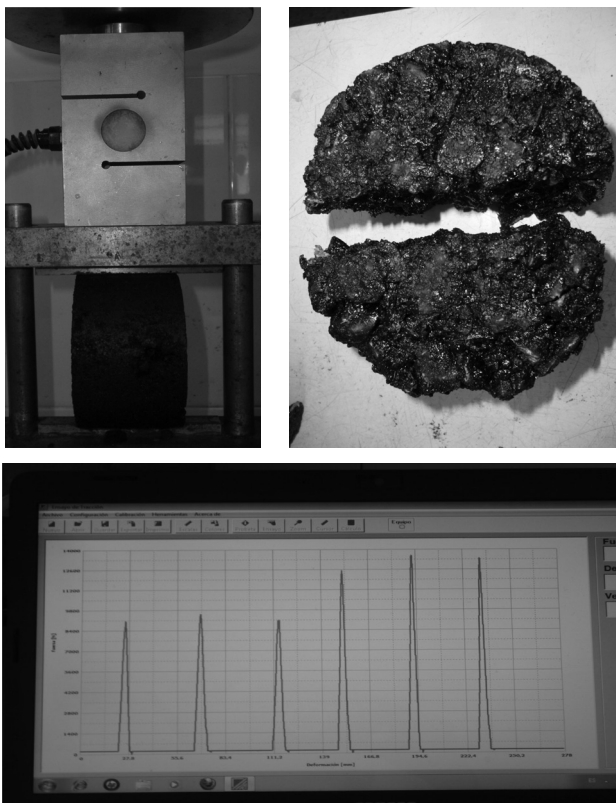


Figura 5. Ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (Compresión Diametral)

Como la gradación, el porcentaje de asfalto, el tipo de agregado y la energía y el método de compactación no varían, el tipo de rotura estará determinado fundamentalmente por el asfalto utilizado y la temperatura de fabricación.

También se ha comprobado que el valor de la resistencia a la tracción es dependiente del grado de envejecimiento de la mezcla e implícitamente del asfalto que la compone [6]. Asfaltos más alterados por altas temperaturas de fabricación se rigidizan presentando en general valores altos de resistencia a tracción lo que en este caso no estaría determinando necesariamente una mayor calidad de la mezcla asfáltica.

a) Temperatura de ensayo: 5 °C

A 5 °C la mayoría de las mezclas asfálticas se comportan como sólidos elásticos y el tipo de rotura predominante es por mástic y agregados: rotura del tipo frágil caracterizada por la presencia de frangas roturas de agregados en el plano de rotura de la mezcla.

No se presentan diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para las tres temperaturas de fabricación.

Tabla 4.- Resistencia a compresión diametral. 5° C.

	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAMETRAL [kPa]									
	M ₁		M ₁ + AMA		M ₂		M ₃		CA-20	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T ₁	4270	35	4457	195	3824	168	3934	146	3655	93
T ₂	4068	45	3806	60	3534	25	4013	167	3780	28
T ₃	4161	78	3977	69	3360	61	4072	114	3980	8
DIF.*	NO		NO		NO		NO		NO	

* Diferencias significativas entre las medias con un 95 % de confianza.

b) Temperatura de ensayo: 15 °C

A 15 °C las mezclas asfálticas presentan roturas predominantemente por mástic y agregados. La presencia de agregados fracturados en el plano de rotura de la probeta es menor que en el caso de rotura a 5 °C. También pueden comportarse como sólidos viscoelásticos y presentar rotura generalizada por mástic.

En el caso de las mezclas con asfalto modificado M₂ se presentan diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para las tres temperaturas de fabricación.

Tabla 5.- Resistencia a compresión diametral. 15° C.

	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAMETRAL [kPa]									
	M ₁		M ₁ + AMA		M ₂		M ₃		CA-20	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T ₁	2908	66	3134	215	2376	50	2656	141	2465	158
T ₂	2706	28	2462	91	2184	4	2199	81	2170	17
T ₃	2661	81	2320	106	1801	123	2175	54	2433	126
DIF.*	NO		NO		SI		NO		NO	

* Diferencias significativas entre las medias con un 95 % de confianza.

c) Temperatura de ensayo: 25 °C

A 25 °C la mayoría de los asfaltos están cerca del límite inferior del comportamiento elástico. La rotura de las probetas es del tipo de rotura por cohesión (mástico) y/o por adherencia (interfase agregado – asfalto)

Para las mezclas con asfaltos M₁, con y sin aditivo, y M₂ no existen diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para las tres temperaturas de fabricación.

En estos casos la cohesión de la mezcla no se ve significativamente disminuida.

Tabla 6.- Resistencia a compresión diametral. 25° C.

	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAMETRAL [kPa]									
	M ₁		M ₁ + AMA		M ₂		M ₃		CA-20	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T ₁	1692	23	1656	170	1470	110	1588	46	1280	39
T ₂	1447	1	1334	58	1342	119	1096	28	982	36
T ₃	1402	28	1214	17	1166	85	1119	65	1169	104
DIF.*	NO		NO		NO		NO		NO	

* Diferencias significativas entre las medias con un 95 % de confianza.

d) Temperatura de ensayo: 35 °C

Tabla 7.- Resistencia a compresión diametral. 35° C.

	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAMETRAL [kPa]									
	M ₁		M ₁ + AMA		M ₂		M ₃		CA-20	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T ₁	904	155	1064	144	888	60	676	39	516	7
T ₂	730	9	730	76	800	30	542	19	435	23
T ₃	706	44	632	12	520	52	505	27	456	26
DIF.*	NO		SI		NO		SI		SI	

* Diferencias significativas entre las medias con un 95 % de confianza.

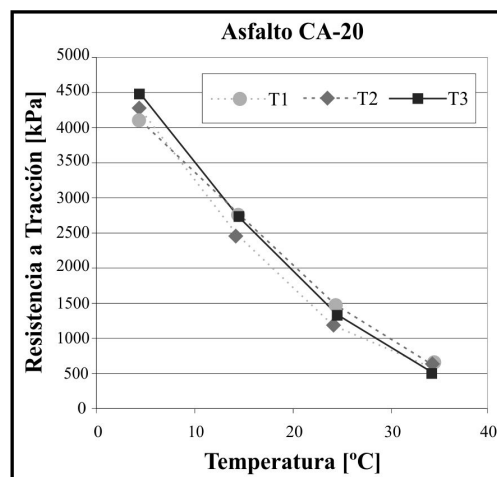
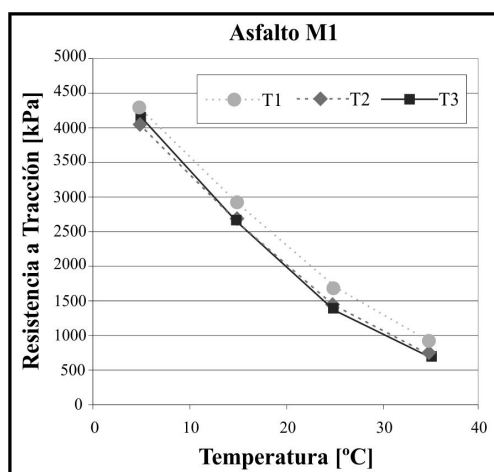
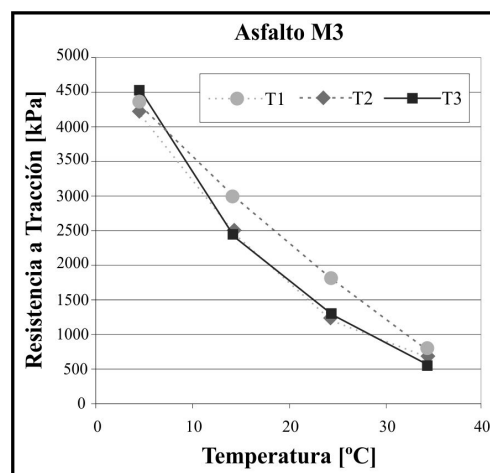
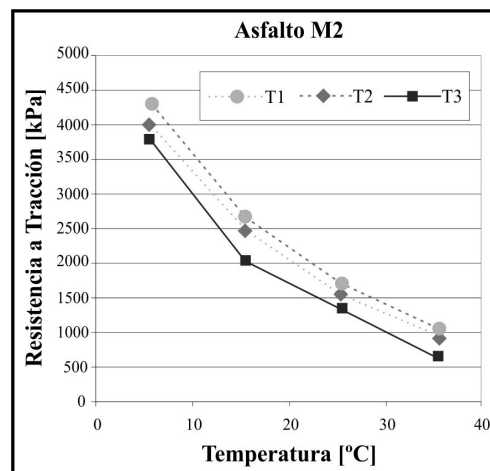
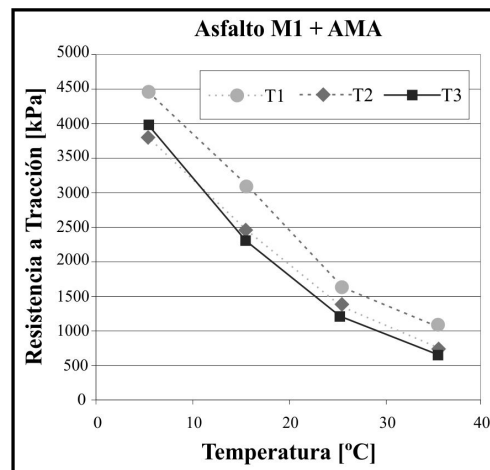


Figura 6. Resistencia a Tracción para las temperaturas de fabricación T₁, T₂ y T₃.

DAÑO POR HUMEDAD

El ensayo de daño por humedad se realiza sobre probetas con 6 á 8% de vacíos. Se comparan las resistencias a tracción de un juego de probetas acondicionadas con las resistencias a tracción de un juego de probetas seco. Esta relación de resistencias o resistencia conservada debe ser superior al 80%.

Las probetas acondicionadas fueron saturadas con agua hasta aproximadamente un 67% del volumen de vacíos y sumergidas a 60 °C durante 24 horas. Luego fueron acondicionadas a la temperatura de ensayo (25 °C) durante 4 horas antes de romperlas por tracción indirecta.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las resistencias conservadas. En tres de los cuatro asfaltos modificados analizados las resistencias conservadas son del mismo orden cuando se comparan las temperaturas de fabricación adoptadas según los manuales del Asphalt Institute [3] [4] y las temperaturas de la simplificación de Bahía para el concepto de viscosidad de corte cero [5].

Es notable la gran cohesión y adherencia que desarrollan las mezclas asfálticas cuando contienen asfalto modificado con polímeros del tipo SBS, con valores que cumplen sobradamente el límite requerido. La resistencia al daño por humedad de la mezcla con asfalto convencional cae casi a la mitad de su valor para las mezclas fabricadas con la temperatura T_2 y prácticamente se anula para las mezclas fabricadas a la temperatura T_3 .



Figura 7. Probetas sometidas a distintos ciclos de Daño por humedad.

Tabla 8.- Resistencia conservada luego del daño por humedad.

	RESISTENCIA CONSERVADA [%]									
	M_1		$M_1 + AMA$		M_2		M_3		CA-20	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T_1	89.2	5.1	84.4	4.2	76.8	2.1	83.0	4.1	77.6	1.1
T_2	82.5	4.2	88.6	1.4	77.2	3.3	64.0	1.8	44.2	0.4
T_3	68.6	2.0	64.9	6.9	64.1	3.1	57.2	2.5	8.8	0.8
DIF. T_1-T_2	NO		NO		NO		SI		SI	
DIF. T_1-T_3	SI		SI		SI		SI		SI	

De los ensayos vistos hasta ahora el daño por humedad fue el más sensible al cambio en las temperaturas de fabricación.

MÓDULO DE RIGIDEZ

El ensayo de módulo de rigidez se realizó en la modalidad de carga por tracción indirecta.

La técnica experimental consiste en aplicar sobre una probeta cilíndrica fuerzas distribuidas a lo largo de dos de sus generatrices diametralmente opuestas. Las sollicitaciones aplicadas tienen carácter dinámico y una magnitud y tiempo de aplicación previamente establecidos. Estas sollicitaciones inducen en la probeta un estado biaxial de tensiones, σ_x (tensión horizontal de tracción) y σ_y (tensión vertical de compresión), en el plano diametral de carga, con lo que el diámetro horizontal sufre una deformación específica horizontal ϵ_x .

Utilizando las ecuaciones de la mecánica que definen a dichas tensiones y su relación con las deformaciones inducidas y resolviendo las integrales correspondiente se define las ecuaciones que permiten determinar el módulo de rigidez.

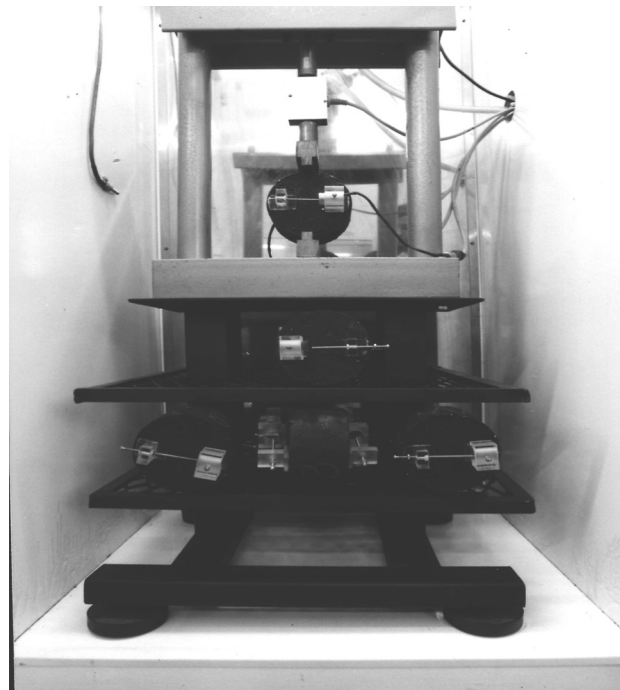
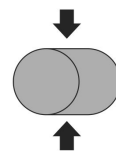


Figura 8. Ensayo de Módulo de rigidez mediante carga dinámica.

Las ecuaciones serán función de las características geométricas de las probetas (diámetro y altura) y de la base de medida utilizada para la medición de las deformaciones. Para probetas de dimensiones Marshall con las bases de medida en los tercios centrales de dos diámetros perpendiculares entre sí, las ecuaciones son:

$$\Delta H = \frac{P}{Et} (0.165 + 0.521 v)$$

$$\Delta V = \frac{P}{Et} (-0.583 - 0.184 v)$$



donde:

P: valor máximo de la carga aplicada dinámicamente en N

t: altura o espesor de la probeta en mm

Δ : variación de la longitud de la base de medida en mm

E: módulo de rigidez en MPa, para las condiciones particulares de temperatura y tiempo de aplicación de la carga

ν : relación de Poisson

Durante el ensayo se registran las cargas P y las deformaciones horizontales y verticales, ΔH y ΔV , con lo que pueden determinarse las dos incógnitas, el módulo de rigidez E y la relación de deformaciones o módulo de Poisson, ν .

Adoptando valores apropiados para la relación de Poisson, el módulo de rigidez E puede obtenerse al conocer la amplitud del pulso de carga P y la variación de longitud del diámetro horizontal Δ , durante el ensayo.

Las teorías elásticas utilizadas son también son aplicables a materiales asfálticos mientras se respete un estado de tensiones que lleven a un comportamiento lineal viscoelástico (LVE), donde los efectos viscosos no son apreciables. Para ello es necesario evitar que deformaciones excesivas lleven a la probeta fuera de dicha hipótesis, regulando el nivel de carga aplicado (amplitud de carga o tensiones).

Se aplicaron ciclos de precarga con la finalidad de limitar deformaciones excesivas, luego de los cuales se inició la adquisición de datos con los ciclos de carga previstos.

Temperatura de ensayo: 20 °C.

Frecuencias de ensayo: 10, 5, 4, 2, 1 y 0.5 Hz.

Tiempo total de ciclo carga – reposo: 2500 milisegundos.

Como se aprecia en la Figura 9 la recuperación de las deformaciones inducidas por la carga pueden separarse en tres valores: la deformación recuperable instantánea o elástica, la deformación recuperable en el tiempo o viscoelástica y una deformación no recuperable que se acumula como deformación permanente al iniciar la siguiente carga.

La deformación elástica se ha determinado como el promedio de cuatro valores: el valor de deformación correspondiente a la intersección de dos líneas de regresiones (D_i), un valor inmediato anterior (D_{i-1}) y los dos valores posteriores (D_{i+1} y D_{i+2}) [7].

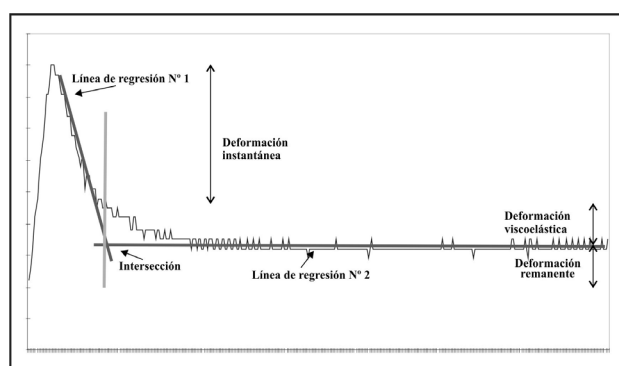


Figura 9.

La energía elástica almacenada permite que se recupere parte de las deformaciones luego de que la carga cesa. El resto de la energía entregada es disipada en viscoelasticidad o histéresis y en deformaciones permanentes. La energía viscoelástica es mayormente recuperable pero requiere tiempo para ser utilizada. La parte permanente de la energía disipada es la que contribuye al ahuellamiento [8].

Los valores del módulo se presentan en la Figura 10. Todos presentan diferencias significativas al 95 % al disminuir las temperaturas de fabricación y en la mayoría de los casos aún con el 99 % de confianza. Los coeficientes de variación están entre 4 y 14 %, menores que lo que especifica la norma (coeficiente de variación estimado aplicable a un laboratorio de 17 á 20 %) por lo que en todos los casos estas diferencias son debidas a la naturaleza del material y no pueden adjudicarse a la naturaleza del ensayo. [8]

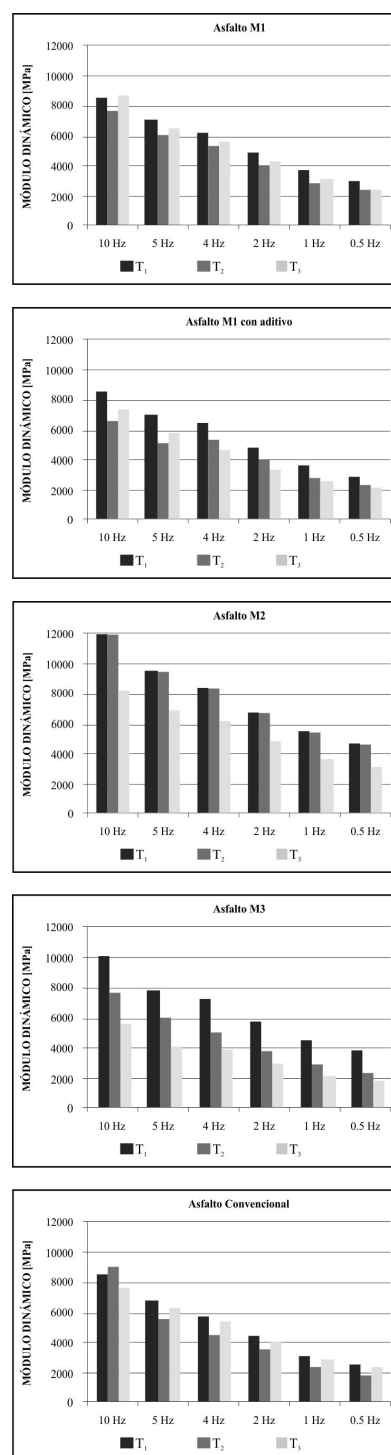


Figura 10.

En el cálculo del módulo se utiliza la deformación recuperable (elástica más viscoelástica). Es decir que el módulo de por sí no permite diferenciar el comportamiento de las mezclas frente a las deformaciones permanentes.

Utilizaremos por tanto algún parámetro que sí permita diferenciar la respuesta de la mezcla. En un trabajo anterior hemos utilizado las relaciones deformaciones permanentes o remanentes al final de cada ciclo ($\epsilon_{rem}/\epsilon_{total}$), deformaciones elásticas ($\epsilon_{elástica}/\epsilon_{total}$) y deformaciones viscoelásticas ($\epsilon_{viscoelástica}/\epsilon_{total}$) [9], como una forma de evaluar la diferente contribución que tienen las mezclas para resistir acumulación de deformaciones permanentes y por tanto presentar potencial resistencia al ahueamiento.

Bajo esta misma premisa utilizaremos la relación entre deformaciones permanentes o remanentes y deformaciones recuperables en cada ciclo, la relación de deformaciones $\epsilon_{permanente}/\epsilon_{recuperable}$ parámetro que ha sido correlacionado con la deformación permanente o ahueamiento [10].

En el siguiente gráfico se presentan los valores de dicha relación entre deformaciones permanentes y resilientes. Figura 12.

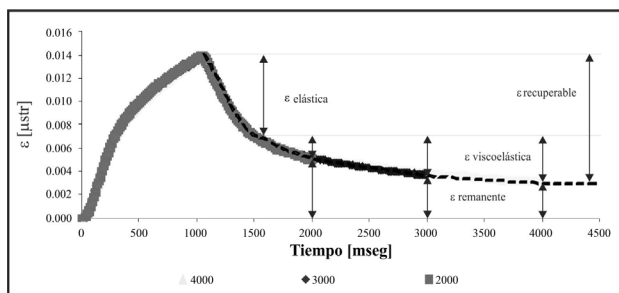


Figura 11. Deformaciones recuperables para cada ciclo de carga: $\epsilon_{elástica} + \epsilon_{viscoelástica}$

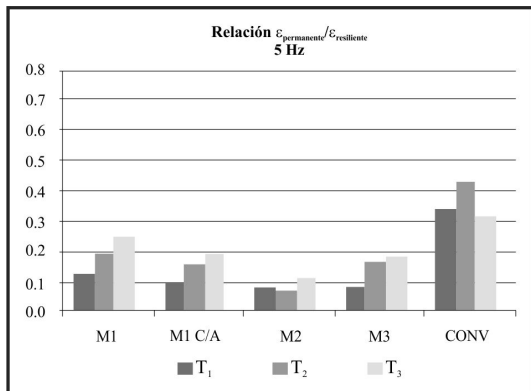
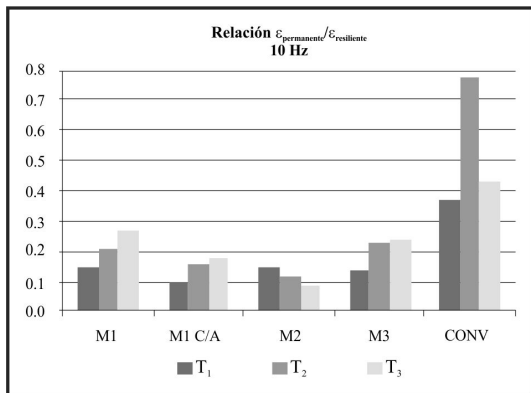
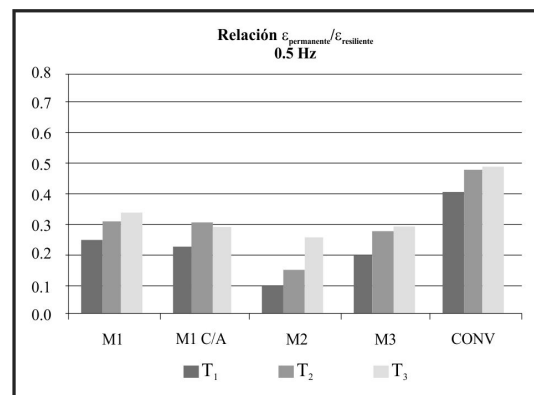
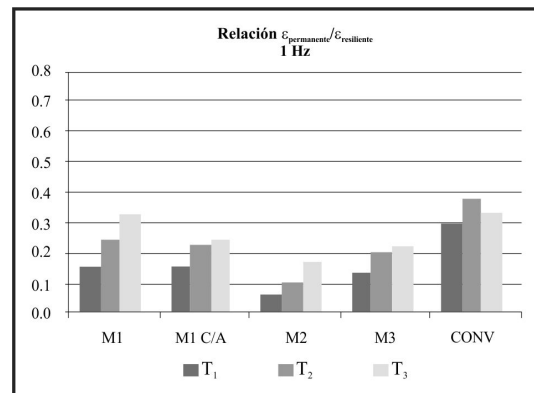
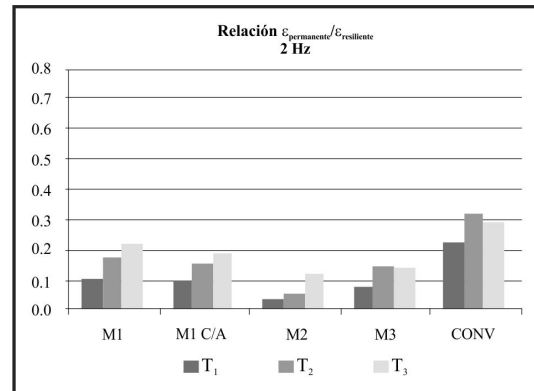
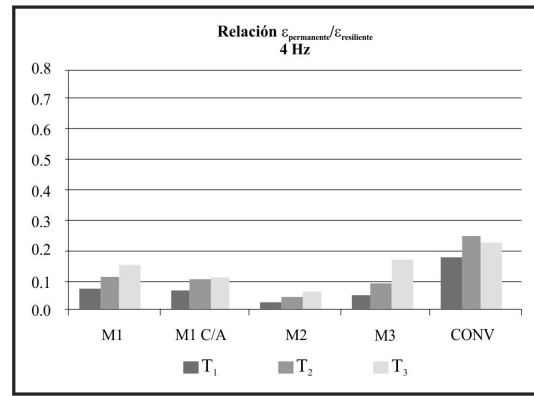


Figura 12.

Puede verse que en todos los casos los valores de la relación entre deformaciones permanentes y resilientes para las mezclas con asfaltos modificados son mucho menores que para las que tienen asfalto convencional.

En general, esta relación crece cuando bajan las temperaturas de fabricación.

Como ejemplo se presentan las deformaciones para las tres temperaturas de fabricación para la frecuencia de sollicitación de 2 Hz. Figura 13.

En los asfaltos modificados la parte viscoelástica de la deformación resiliente se mantiene igual o crece levemente con las variaciones en las temperaturas de fabricación. Una leve disminución en las deformaciones elásticas y un leve aumento en las deformaciones permanentes hacen crecer la relación $\epsilon_{\text{permanente}}/\epsilon_{\text{recuperable}}$.

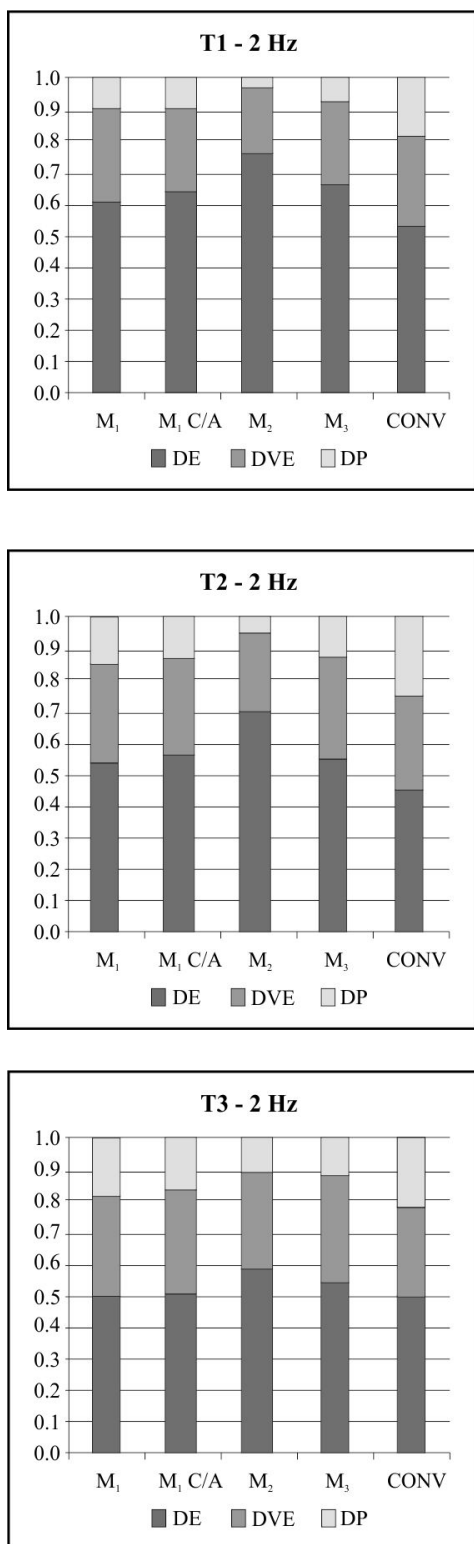


Figura 13.

A relativamente altas frecuencias de sollicitación sólo en el asfalto M₂ aparece un leve aumento en las deformaciones elásticas al disminuir las temperaturas de fabricación. Esto hace disminuir la relación $\epsilon_{\text{permanente}}/\epsilon_{\text{recuperable}}$.

Las deformaciones permanentes o remanentes al final del ciclo son superiores en los asfaltos convencionales.

La acumulación de deformaciones permanentes luego de cada ciclo de carga nos permite también mostrar la respuesta del material frente al potencial ahuellamiento. Si bien es más utilizado en ensayos de creep (mayor duración del tiempo de carga) se utilizó para medir el límite del comportamiento lineal viscoelástico de las mezclas evaluadas.

En la Figura 14 se presentan dichos valores para 25 ciclos de carga.

- A las temperaturas normalizadas de fabricación las deformaciones permanentes acumuladas por la mezcla con asfalto convencional siempre son superiores a las acumuladas por las mezclas con asfaltos modificados y con mayor tendencia de crecimiento (mayor pendiente).

Cuando las temperaturas de fabricación disminuyen puede verse que para las frecuencias de sollicitación menores a 10 Hz existen grandes diferencias entre el comportamiento reológico de las mezclas con asfaltos modificados y la mezcla con asfalto convencional: la mezcla con asfalto convencional desarrolla deformaciones permanentes aún más rápidamente que las mezclas realizadas a las temperaturas T₁.

- Para las más bajas temperaturas de fabricación analizadas en este trabajo la mezcla con asfalto convencional excede el límite de viscoelasticidad de aproximadamente 80 μst para frecuencias menores a 2 Hz. Las mezclas con asfaltos modificados se encuentran muy por debajo de dicho límite con valores máximos de 30 μst .

CONCLUSIONES

- Tanto las estabilidades, como las resistencias a tracción a 5 y 15°C no se ven significativamente afectados cuando se disminuyen las temperaturas de fabricación.

- La resistencia al daño por humedad no se ve afectada en tres de los asfaltos modificados estudiados cuando se utilizó la temperatura T₂ de fabricación y sí se ve significativamente disminuida en los cuatro asfaltos modificados cuando se utilizó la temperatura T₃. En el asfalto convencional la disminución de las temperaturas de fabricación destruye la capacidad de la mezcla a resistir el ataque del agua.

- Algunas resistencias a tracción a 25 y 35°C se ven significativamente afectadas cuando se disminuyen las temperaturas de fabricación.

- Los coeficientes de variación confirman la repetitividad del ensayo por lo que puede afirmarse que los valores de módulo también se ven significativamente afectados, con un 95% de confiabilidad, cuando se disminuyen las temperaturas de fabricación.

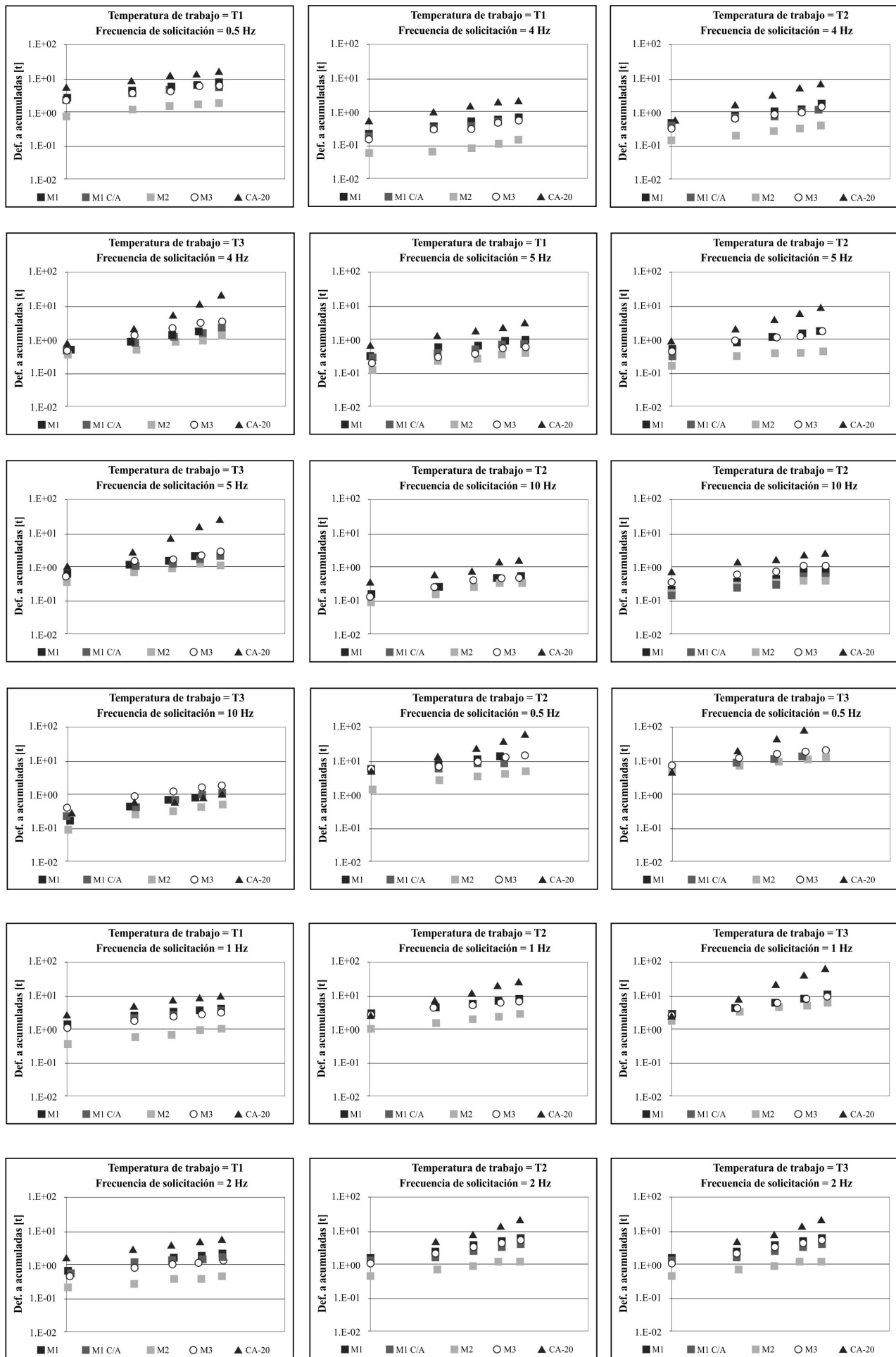


Figura 13.

- Una disminución de las temperaturas de fabricación no tiene el mismo efecto reológico en mezclas con asfaltos modificados que en mezclas con asfalto convencional: los valores del parámetro $\epsilon_{\text{permanente}}/\epsilon_{\text{resiliente}}$ son mayores para las mezclas con asfalto convencional.

- El parámetro $\epsilon_{\text{permanente}}/\epsilon_{\text{resiliente}}$ correlaciona con el potencial ahuellamiento [7]. En un primer análisis puede decirse que los resultados lo confirman ya que presentan marcada diferencia de comportamiento entre asfaltos convencionales y modificados.

- La acumulación de deformaciones permanentes parece ser más sensible al efecto de la disminución de las temperaturas de fabricación.

- Por lo analizado en el presente trabajo se concluye que las mezclas asfálticas realizadas con asfaltos modificados

permiten una disminución de las temperaturas de fabricación a las temperaturas propuestas por Bahía y otros [5], basadas en el concepto de viscosidad a corte cero, o a las propuestas por Salomón Cué [11] basadas en el concepto de energía de activación, sin afectar significativamente las propiedades mecánicas analizadas.

- La disminución de las temperaturas de fabricación dentro de valores aceptables permitirá igualmente un significativo ahorro de energía y mayores niveles de seguridad en obra.

- En el análisis de las deformaciones permanentes acumuladas del ensayo de módulo dinámico se aprecia un crecimiento de las deformaciones cuando disminuyen las temperaturas de fabricación de las mezclas con asfalto modificado. Se prevé la continuación de este proyecto verificando este efecto con los ensayos de ahuellamiento.

REFERENCIAS

[1] Agnusdei, Jair, Iosco, Fernández, López. Optimización de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta de mezclas bituminosas con la utilización de ligantes modificados. Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto 2004. Cartagena de Indias, Colombia.

[2] Marcozzi, R. Utilización del Compactador Giratorio Superpave para evaluar la compactabilidad de las mezclas asfálticas. Memorias de la XXXIII° Reunión del Asfalto 2004. Mendoza, Argentina.

[3] Asphalt Institute Series N° 2 (MS-2), Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot – mix Types.

[4] Asphalt Institute Series N° 2 (SP-2), Superpave Mlevel 1 Mix Design

[5] Khatri, Bahía and Hanson. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyrotory Compactor. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 368 -401, Marzo 2001.

[6] Marcozzi, R. Análisis preliminar sobre la utilización del ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas diseñadas mediante el Sistema Superpave. Segunda Parte. Memorias de la XXXIII° Reunión del Asfalto, Tafi del Valle, Argentina. Noviembre del 2002.

[7] Standard Test Method for determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension – AASHTO Designation TP 31 – 96, AASHTO Provisional Standards, April 2000 Edition.

[8] Bahia, H., Zhai H., Zeng M., Hu Y., Turner, P. Development of binder specification parameters based on characterization of damage behaviour. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 442 -470, Marzo 2001.

[9] Marcozzi, R. Influencia de las propiedades viscoelásticas de los asfaltos y su comportamiento en mezcla asfáltica. Memorias del XII° CILA, Quito, Ecuador, Noviembre 2003.

[10] Witeczak M., Kaloush K., Pellinen T., El-Basyouny, M., Von Quintus, H. Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP Report 465. Transportation Research Board – National Research Council, Washington, EE.UU. 2002.

[11] Salomón Cué, Huachun Zhai Cui. Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes bituminosos. Memorias del XII° CILA, Quito, Ecuador, Noviembre 2003.

EFECTOS DE LA REDUCCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS EN CALIENTE - Segunda Parte

Marcozzi R. G., Falivene J. A.

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar los efectos sobre las propiedades mecánicas determinadas en laboratorio al disminuir las temperaturas de mezclado y compactación.

En la primera parte del trabajo se observó que algunos de los ensayos analizados resultaron más sensibles para evaluar el efecto de la reducción de las temperaturas de fabricación. En esta oportunidad se completa el análisis mecánico previsto en la primera sección del proyecto con ensayos de rueda cargada en dos de sus modalidades, en seco y bajo inmersión.

Se concluye que las mezclas asfálticas realizadas con asfaltos modificados permiten una disminución de las temperaturas de trabajo dentro de valores aceptables. Esto permitirá igualmente un significativo ahorro de energía y mayores niveles de seguridad en obra.

PLAN EXPERIMENTAL

Se diseñó una mezcla asfáltica de granulometría fina. [1]

Se realizaron juegos de probetas para determinaciones de parámetros mecánicos. Las probetas se fabricaron con tres rangos de temperaturas de trabajo: T_1 , T_2 y T_3 . T_1 es la temperatura recomendada en Argentina, y T_2 y T_3 son temperaturas inferiores a ésta.

Se analizaron dichas mezclas asfálticas para evaluar si los parámetros mecánicos seleccionados se ven afectados significativamente por el cambio en las temperaturas de fabricación.

Los parámetros analizados en la primera parte del trabajo fueron los siguientes:

- Estabilidad y fluencia.
- Resistencia a compresión diametral a distintas temperaturas de ensayo.
- Daño por humedad
- Módulo de rigidez

En esta segunda parte los parámetros analizados fueron los siguientes:

- Deformaciones permanentes en seco

- Deformaciones permanentes bajo inmersión

DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

En trabajos realizados anteriormente en nuestro laboratorio hemos comprobado que mezclas asfálticas de granulometrías convencionales y no convencionales realizadas con asfaltos modificados pueden ser fabricadas a temperaturas inferiores a las normalizadas con el mismo esfuerzo sin variar significativamente la resistencia que presentan al ser compactadas, presentando, por tanto, propiedades volumétricas similares [2] [3].

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS CORRESPONDIENTE A LA PRIMERA PARTE DEL TRABAJO [1]

Las conclusiones más importantes de la primera parte de este trabajo fueron las siguientes:

- Los valores de estabildades no se vieron significativamente afectados cuando se disminuyeron las temperaturas de fabricación de las probetas.
- Las resistencias a tracción a 5 y 15 °C no se vieron significativamente afectadas cuando se disminuyeron las temperaturas de fabricación. A temperaturas de ensayo superiores algunas mezclas se ven significativamente afectadas.
- Con el asfalto convencional la disminución de las temperaturas de fabricación de las probetas destruye la capacidad de la mezcla para resistir el ataque del agua. En tres de los asfaltos modificados estudiados el daño por humedad (AASHTO T-283) no resultó significativamente afectado cuando se utilizó la temperatura T_2 para fabricar las probetas y, a pesar de resultar significativamente afectados, cuando se utilizó la temperatura T_3 se conservaron importantes valores de resistencia.
- Los valores de módulo también se vieron significativamente afectados cuando se disminuyeron las temperaturas de fabricación, las mezclas con asfaltos modificados se vuelven más flexibles.
- Las relaciones entre deformaciones permanentes y

deformaciones recuperables luego del ciclo de carga, $\epsilon_{\text{permanente}}/\epsilon_{\text{resiliente}}$ resultaron mayores para las mezclas con asfalto convencional en todas las condiciones de ensayo realizadas.

- La acumulación de deformaciones permanentes en el ensayo de módulo dinámico diferencia claramente el comportamiento de la mezcla con asfalto convencional. En este ensayo se aprecia que la disminución de las temperaturas de fabricación no tiene el mismo efecto reológico sobre mezclas con asfaltos modificados o especiales.

- Dos ensayos aparecen como los más sensibles frente a la disminución de las temperaturas de fabricación. Uno de ellos es el de acumulación de deformaciones permanentes en ciclos de carga dinámica, el otro es el de daño por humedad (AASHTO T-283).

- Basados en estos resultados, las mezclas asfálticas realizadas con asfaltos modificados permiten una disminución de las temperaturas de fabricación a las temperaturas propuestas por Bahía y otros [4, 5], basadas en el concepto de viscosidad a corte cero del ligante, sin afectar significativamente las propiedades mecánicas analizadas.

ENSAYOS DE RUEDA CARGADA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La continuación del proyecto previó la realización de ensayos de ahuellamiento por rueda cargada (WTT) y ensayos de adherencia Hamburgo Wheel Tracking Test (HWTT), por considerarlos herramientas importantes en la verificación de un diseño de mezclas asfálticas.

Los gráficos de acumulación de deformaciones permanentes de los materiales en estudio presentan tres etapas bien diferenciadas, Figura 1:

1. Zona primaria: porción del gráfico en la que la velocidad de deformación decrece a medida que aumenta el tiempo de ensayo,
2. Zona secundaria: la porción en la cual la velocidad de deformación es constante a medida que aumenta el tiempo de ensayo,
3. Zona de flujo terciario: la porción donde la velocidad de deformación crece a medida que aumenta el tiempo de ensayo. Esta zona de inestabilidad se asocia a deformaciones con cambio de volumen por sobrecompactación en el

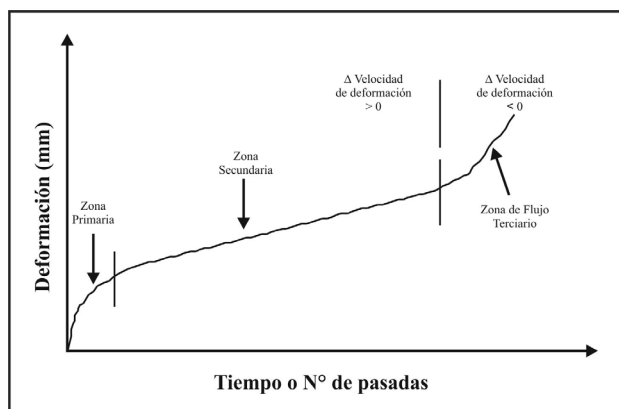


Figura 1.

caso del ensayo de rueda cargada o por stripping y/o sobrecompactación en el ensayo Hamburgo.

El desarrollo de las zonas será función de las condiciones de ensayo: peso de la rueda, el tiempo de ensayo, la temperatura, en seco o bajo inmersión, etc.

Por ejemplo: el ensayo de rueda cargada en seco (WTT – Wheel Tracking Test) se realizó con una duración de 120 minutos. Durante este tiempo, en general, sólo alcanza a desarrollarse la segunda zona, es decir la zona de deformaciones estables.

Sin embargo en el ensayo de rueda cargada bajo inmersión (HWTT – Hamburgo Wheel Tracking Test), de 6 horas de duración y una carga superior, se combinan tres condiciones adversas, la deformación producida por el tránsito, alta temperatura y daño por humedad. En general, se presentan las condiciones suficientes para que se desarrolle la curva completa. En el ensayo HWTT, a pesar de no poder disociarse completamente dichos efectos, la zona secundaria está asociada con la deformación y la zona de flujo terciario está asociada con el inicio de la pérdida de adherencia y cohesión, es decir con el daño causado por el agua.

ENSAYO DE RUEDA CARGADA EN SECO

Las condiciones de ensayo fueron:

Temperatura del ensayo: 60 °C en cámara de ventilación forzada

Carga de la rueda: 520 N

Velocidad: 42 pasadas/min

Duración del ensayo: 120 minutos

Dimensiones de la probeta: 30cmx30cmx5cm

Densidad de la probeta: densidad de diseño, en nuestro caso, correspondiente al 4% de vacíos.



Figura 2. Ensayo de rueda cargada

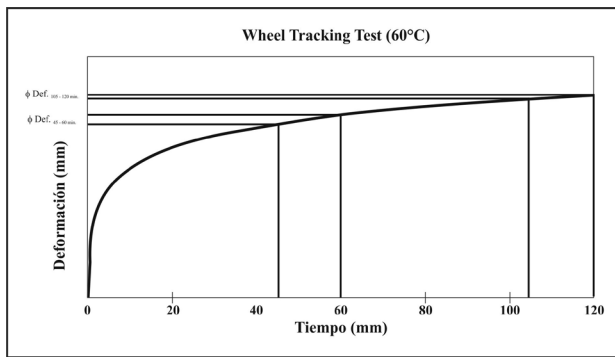


Figura 3. Ensayo de rueda cargada

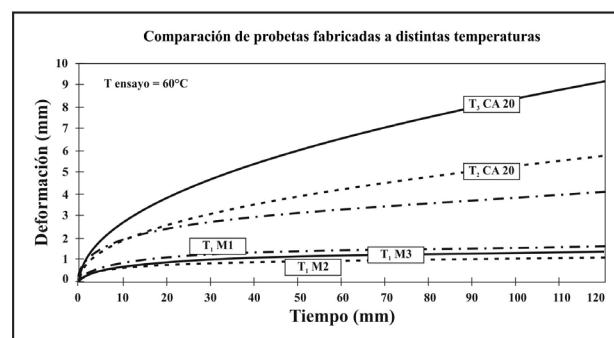
Los parámetros del ensayo son:

- Deformación máxima, en mm, a los 60 y los 120 min.
- Estabilidad dinámica, en pasadas/mm, es decir, el número de pasadas necesarias para deformar la mezcla asfáltica 1 mm, evaluada entre los minutos 45 y 60 y entre los minutos 105 y 120, en los que la pendiente de deformación se considera estable.

La Estabilidad Dinámica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\text{estabilidad Dinámica}} = \frac{42}{\frac{\Delta \text{Deformación}}{\Delta \text{tiempo}}} \left[\frac{\text{pasadas / minuto}}{\text{mm / minuto}} \right]$$

En los siguientes gráficos se presentan comparativamente las curvas de ahuellamiento del Wheel Tracking Test de mezclas con diferentes temperaturas de fabricación. En cada tabla se muestran los valores de deformación máxima y la estabilidad dinámica para las mezclas con asfalto convencional y el asfalto modificado correspondiente.



Cemento Asfáltico	CA-20			M1c/ad		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Temperaturas						
Estabilidad dinámica (entre los minutos 45 y 60) [pasadas/mm]	2200	1267	744	8153	11712	7893
Deformación Máxima a los 60 min. de ensayo [mm]	3.32	4.24	6.53	1.40	0.94	1.15
Estabilidad dinámica (entre los minutos 105 y 120) [pasadas/mm]	3723	1892	1105	17071	21547	15476
Deformación Máxima a los 120 min. de ensayo [mm]	4.12	5.77	9.13	1.59	1.08	1.35

Figura 4.

En comparación con el asfalto convencional CA-20 el asfalto modificado M1 acumula deformaciones en forma muy lenta, aún para las mezclas fabricadas a temperaturas reducidas T₂ y T₃ (Figura 4). Lo mismo sucede con las mezclas realizadas con el asfalto modificado M1 con aditivo mejorador de adherencia (Figura 5).

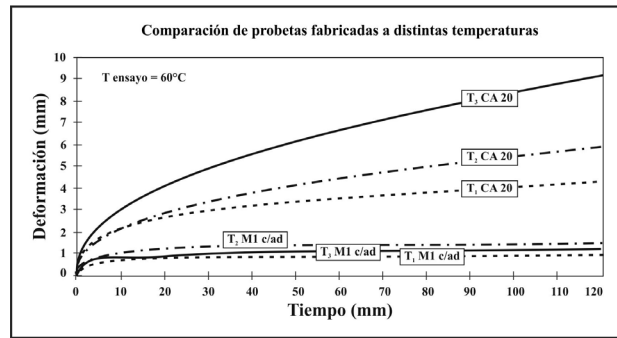
Las estabildades dinámicas de las mezclas con asfaltos modificados M1 y M1 con aditivo mejorador de adherencia, fabricadas con las temperaturas T₁ muestran valores del orden de 4 a 6 veces superiores del que presenta la mezcla con el asfalto convencional CA-20.

En la figura 6 se comparan los comportamientos bajo rueda cargada de mezclas fabricadas a distintas temperaturas con el asfalto convencional CA-20 y el asfalto modificado M2.

Para las mezclas realizadas con las temperaturas normalizadas de mezclado y compactación, T₁, la estabilidad dinámica de la mezcla con asfalto modificado M2 muestra un valor del orden de 5 veces el presentado por la mezcla con asfalto convencional CA-20.

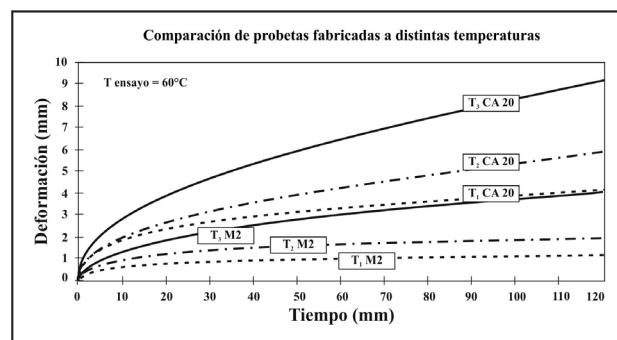
En el caso del asfalto modificado M2 la utilización de las temperaturas de fabricación T₂ muestra que la acumulación de deformaciones permanentes se conserva también dentro de valores pequeños y las estabildades dinámicas presentan valores muy adecuados, del orden de 3 veces el presentado por la mezcla con asfalto convencional CA-20 fabricada a la temperatura normalizada (T₁).

Es decir que, según los resultados del ensayo de rueda cargada, los pavimentos con asfalto convencional son muy sensibles frente a la eventual caída de temperatura durante su fabricación. Las prestaciones de los asfaltos modificados con polímeros o los asfaltos especiales son superiores, aún cuando se fabriquen a temperaturas reducidas.



Cemento Asfáltico	CA-20			M1c/ad		
Temperaturas	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Estabilidad dinámica (entre los minutos 45 y 60) [pasadas/mm]	2200	1267	744	11678	8616	10838
Deformación Máxima a los 60 min. de ensayo [mm]	3.32	4.24	6.53	0.49	0.95	0.74
Estabilidad dinámica (entre los minutos 105 y 120) [pasadas/mm]	3723	1892	1105	21304	14981	18754
Deformación Máxima a los 120 min. de ensayo [mm]	4.12	5.77	9.13	0.64	1.15	0.90

Figura 5.



Cemento Asfáltico	CA-20			M1c/ad		
Temperaturas	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
Estabilidad dinámica (entre los minutos 45 y 60) [pasadas/mm]	2200	1267	744	9892	4846	1801
Deformación Máxima a los 60 min. de ensayo [mm]	3.32	4.24	6.53	0.96	1.57	2.98
Estabilidad dinámica (entre los minutos 105 y 120) [pasadas/mm]	3723	1892	1105	20721	11455	2778
Deformación Máxima a los 120 min. de ensayo [mm]	4.12	5.77	9.13	1.12	1.91	4.02

Figura 6.

ENSAYO DE RUEDA CARGADA BAJO INMERSIÓN

Las características del aparato Hamburgo utilizado y la operatoria general se describen extensamente en el trabajo realizado por Agnusdei y otros [6].

Las condiciones de ensayo fueron:
 Temperatura del ensayo: 50 °C, en cuba con agua recirculando
 Carga de la rueda: 705 N
 Velocidad: 50 ± pasadas/min
 Duración del ensayo: 20000 pasadas o deformación

máxima de 12.5 mm, lo que ocurra primero.
 Dimensiones de la probeta: 30cmx30cmx5cm
 Densidad de la probeta: correspondiente al 8% de vacíos

La curva de las deformaciones debidas simultáneamente al paso de una rueda cargada y a la acción del agua a temperatura elevada, en general, desarrolla las tres zonas. Como dijimos previamente en la bibliografía al respecto la zona secundaria está asociada con la deformación y la zona de flujo terciario está asociada con el inicio de la pérdida de adherencia y cohesión.

En algunos de los casos que evaluamos se aprecia

claramente la pérdida de la película de asfalto y el desprendimiento de agregados en la huella, mostrando que el agua ha desplazado a la película que recubría a los agregados, es decir, hay pérdida de adherencia. Figura 7.

En otros casos no se aprecia visualmente ningún desprendimiento de agregados sino que la huella presenta el aspecto de una sobrecompactación. Figura 8.

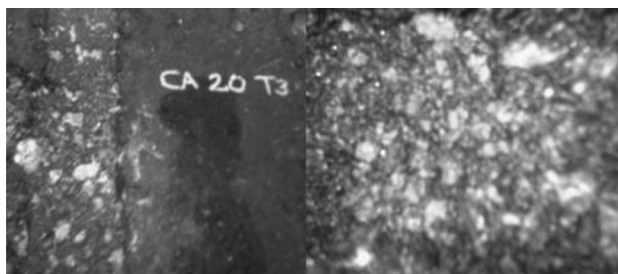


Figura 7. Huella con franco desprendimiento y detalle de la zona con "stripping".

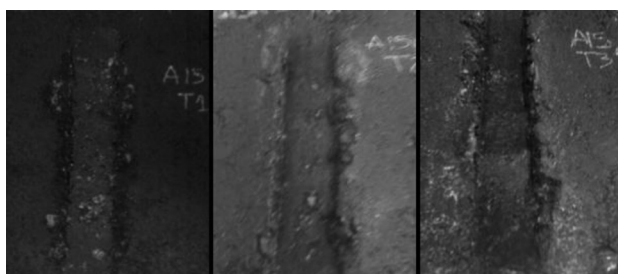


Figura 8. Huellas sin desprendimiento luego del ensayo Hamburgo.

Los mecanismos del daño por humedad mejor documentados en la bibliografía son:

- Pérdida de adherencia: está basado en un fenómeno químico donde las moléculas de agua alteran la interacción entre el asfalto y la superficie del agregado. El agua, más que el asfalto, mojará preferencialmente al agregado.

- Pérdida de cohesión: es la pérdida de liga entre moléculas de asfalto.

- Emulsificación de la película de asfalto: debido a la presencia de agentes emulsivos en el agregado o en el asfalto mismo. El tráfico promueve dicha emulsificación.

- Presión de poros: el agua atrapada en los vacíos del pavimento alcanza suficiente presión para romper la película de asfalto con la acción combinada de altas temperatura y tránsito. Esta presión alterna entre compresión y tracción y puede finalmente despegar al asfalto del agregado.

Los parámetros obtenidos en los ensayos Hamburgo son los siguientes:

- Punto de intersección de la pendiente de deformación con la pendiente del flujo terciario, medido a través del número de pasadas de la rueda.

- Número de pasadas para alcanzar una deformación de 12.5 mm

En el Gráfico 7 se presentan las curvas de deformaciones de los ensayos Hamburgo en mezclas con diferentes temperaturas de fabricación, comparando en cada una de ellas las curvas de la mezcla de asfalto convencional con las mezclas del asfalto modificado en estudio.

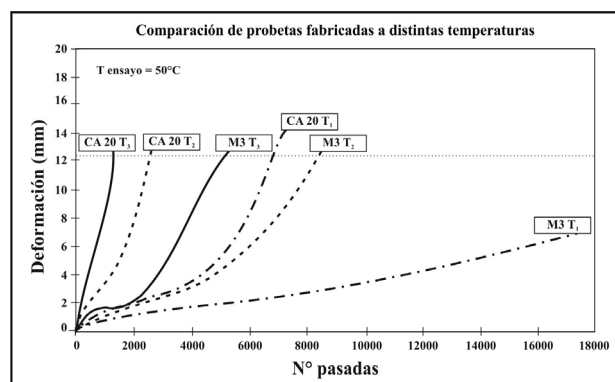
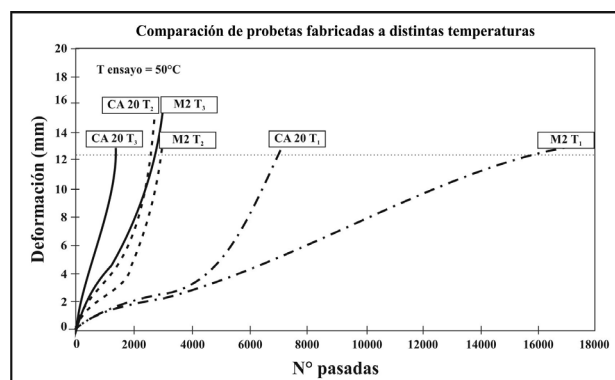
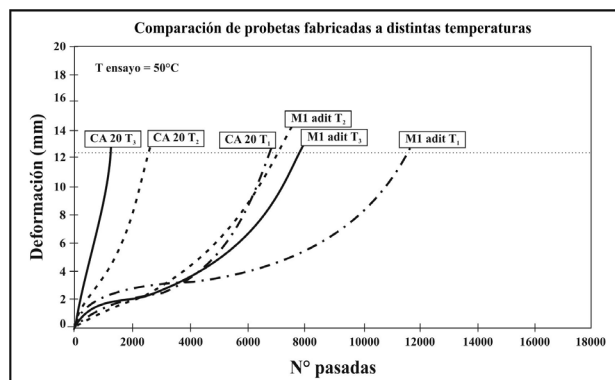
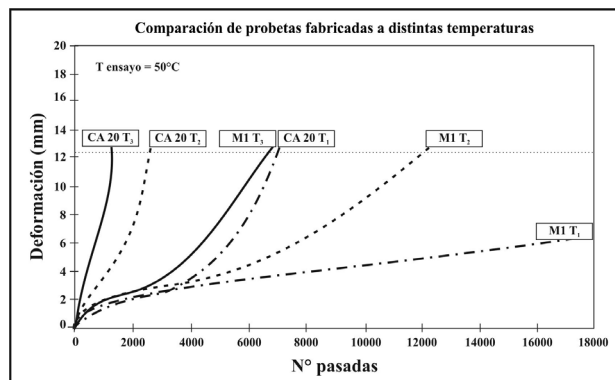


Gráfico 7.- Curvas del desarrollo de las deformaciones en el ensayo Hamburgo

1. La mezcla patrón realizada con asfalto CA-20 no es una mezcla con buena resistencia al daño por humedad ya que alcanza rápidamente la pendiente de stripping.

2. La mayoría de los asfaltos modificados presentan un excelente comportamiento frente al daño por humedad cuando son fabricados con las temperaturas T_1 .

3. En todos los casos, una disminución de las temperaturas de trabajo aumenta el daño por humedad.

Debido a que los nuevos proyectos de pliego contemplan el uso obligatorio de un 1% de cal en las mezclas asfálticas, se reemplazó un 1% del material de tamaño menor a 0.075 mm por cal hidratada. La cal tiene al menos tres funciones conocidas: aumenta la viscosidad del asfalto, actúa químicamente sobre la superficie del agregado (en nuestro caso, granítico) y aumenta la viscosidad del mástico.

En el gráfico 8 se presentan los ensayos realizados.

En todos los casos de las mezclas realizadas con asfaltos modificados a temperaturas reducidas, la resistencia al daño por humedad aumenta en forma importante. Las

mezclas requieren mayores números de pasada de la rueda para desarrollar la inestabilidad asociada al flujo terciario.

Otra de las variables asociadas al daño por humedad es el grado de compactación de la mezcla ya que si los vacíos son bajos la mezcla será prácticamente impermeable, si por el contrario, los vacíos son muy altos, las mezclas que tengan un adecuado drenaje no desarrollarán presión de poros. Entre estos extremos hay un rango de vacíos entre los que se desarrollan las condiciones críticas de presión de poros.

A fin de poner de manifiesto la influencia del porcentaje de vacíos cuando se trabaja con temperaturas reducidas se realizaron probetas con el 5% de vacíos para las mezclas con asfaltos M1 aditivado y M2, dos de las mezclas más afectadas por el daño por humedad cuando se ensayaron con 8% vacíos. Gráfico 9.

En la mezcla con el asfalto con aditivo mejorador de adherencia, la disminución de vacíos mejoró notablemente la resistencia de la mezcla, inclusive la realizada con la temperatura T_1 .

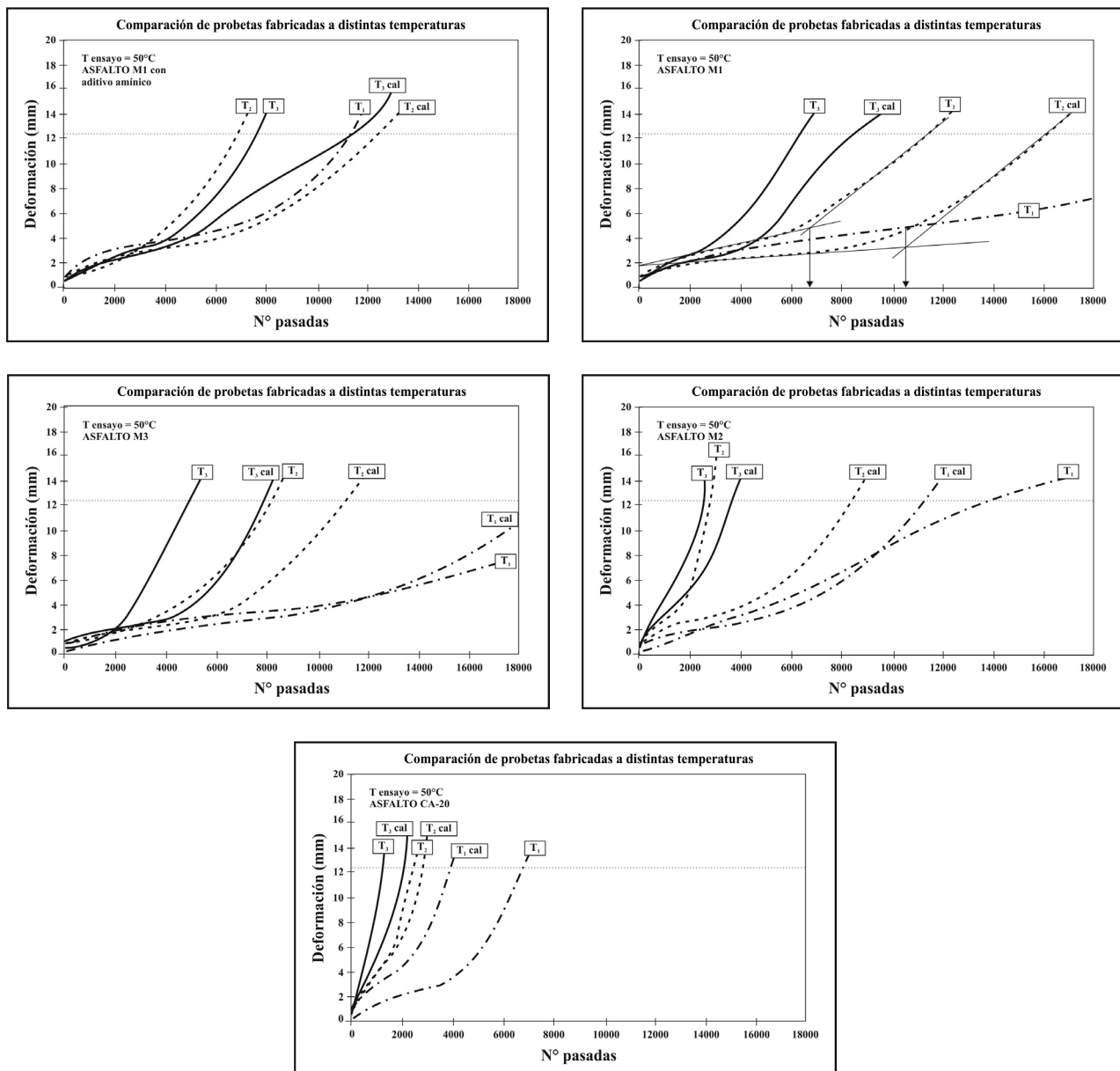


Gráfico 8.- Influencia de cal sobre la resistencia a la humedad

En el caso de la mezcla con asfalto M2, la disminución de vacíos no cambia la resistencia de las mezclas fabricadas a T_1 y mejoran muy poco la resistencia de las mezclas fabricadas a las menores temperaturas.

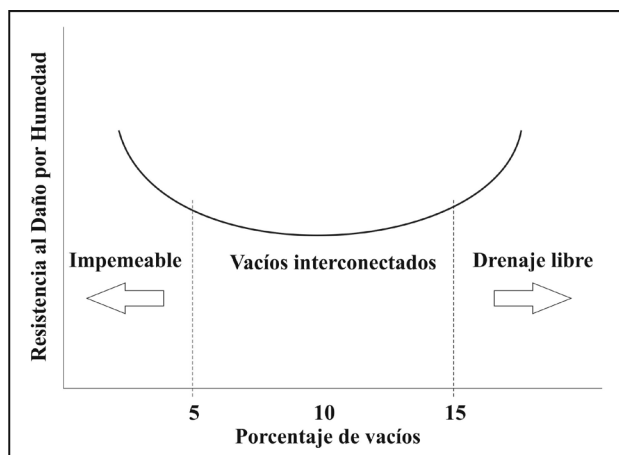


Gráfico 9.- Influencia de cal sobre la resistencia a la humedad

CONCLUSIONES

Como habíamos concluido en el trabajo anterior, los ensayos realizados indican cambios en las propiedades cohesivas y/o de adherencia de las mezclas asfálticas cuando se trabaja con temperaturas de mezclado y compactación reducidas.

Otra de las conclusiones fue que en la mayoría de los casos analizados estos cambios no se presentan como significativos al utilizar asfaltos modificados con polímeros o asfaltos especiales en mezclas fabricadas con las temperaturas T_2 .

Ahora bien, el trabajo se ha completado con el análisis de las deformaciones permanentes.

Las deformaciones permanentes en el ensayo de rueda cargada en seco prácticamente no se ven afectadas al utilizar la temperatura de trabajo reducida T_2 y las deformaciones máximas se conservan dentro de valores muy pequeños.

Respecto del ensayo Hamburgo puede concluirse que:

- Las condiciones de adherencia y cohesión de las mezclas cambian cuando se utilizan temperaturas de fabricación reducidas.

REFERENCIAS

- [1] Marcozzi, R. Algunos conceptos reológicos sobre mezclas asfálticas compactadas a diferentes temperaturas – Primera parte. Memorias de la XIII° CILA, 2005. San José de Costa Rica, Costa Rica.
- [2] Agnusdei J.O., Jair M, Iosco O.A., Fernández A.I., López, M. Optimización de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta de mezclas bituminosas con la utilización de ligantes modificados. Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto 2004. Cartagena de Indias, Colombia.
- [3] Marcozzi, R. Utilización del Compactador Giratorio Superpave para evaluar la compactabilidad de las mezclas asfálticas. Memorias de la XXXIII° Reunión del Asfalto, 2004. Mendoza, Argentina.
- [4] Khatri, Bahía and Hanson. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyrotory Compactor. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 368 -401, Marzo 2001.
- [5] Bahia, H., Zhai H., Zeng M., Hu Y., Turner, P. Development of binder specification parameters based on characterization of damage behaviour. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 442 -470, 2001.

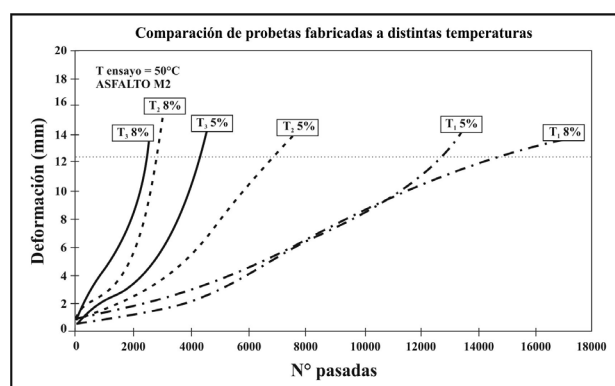
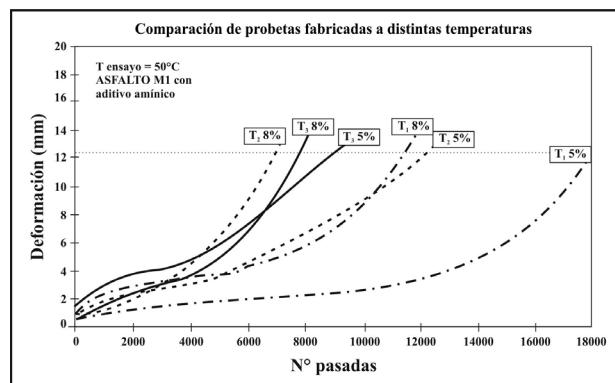


Gráfico 10.- Influencia de cal sobre la resistencia a la humedad

- En la mayoría de los casos es conveniente prevenir fallas de adherencia utilizando porcentajes mínimos de cal en la dosificación, tal como lo especifican las recomendaciones de la Comisión Permanente del Asfalto.

- La disminución de las temperaturas de trabajo dentro de valores aceptables permite igualmente un significativo ahorro de energía y mayor nivel de seguridad en obra.

- Hay que evaluar en cada caso el beneficio de reducir temperaturas de trabajo y la calidad esperada del producto.

Se consideran como puntos a investigar las características de los ligantes luego de ser sometidos a los procesos de mezclado y compactación a temperaturas inferiores a las recomendadas. Por efecto de las menores temperaturas a las que fue sometido, el asfalto sufrirá menor envejecimiento y su comportamiento reológico puede ser diferente.

[6] Agnusdei J.O., Iosco, O.A., Morea, F. Daños por humedad en mezclas asfálticas. Memorias de la XIII° CILA, 2005. San José de Costa Rica, Costa Rica.

[8] Santucci, L. Moisture sensitivity de asphalt pavements. Technology Transfer Program. Publicación del Institute of Transportation Studies (ITS).

VENTAJAS DE LAS MEZCLAS TIBIAS

Marcozzi R. G., Bisio A.

Por definición, las Mezclas tibias son aquellas mezclas que, mediante la utilización de una serie de tecnologías, permiten producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales sin afectar significativamente su comportamiento mecánico ni su durabilidad.

Pueden hacerse de granulometría continua, discontinua, SMA, drenantes, etc. con asfaltos convencionales, modificados o especiales

La reducción de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asfálticas tibias se traduce en una serie de ventajas ambientales, operativas, de durabilidad y seguridad.

Entre las ventajas ambientales podemos citar reducciones de emisiones de dióxido de carbono (Figura 1) principal causante del efecto invernadero, disminución de emisión de SO₂ y NOx, causantes de la formación de partículas en la atmósfera y que contribuyen al deterioro de la capa de ozono y la reducción del uso de combustible, verificándose ahorros del 15 al 35% del consumo de fuel-oil en relación a las mezclas convencionales, Figura 2.

Entre las ventajas operativas de las mezclas tibias se encuentra su menor gradiente térmico que disminuye la velocidad de enfriamiento y nos da la posibilidad de pavimentar a menores temperaturas ambientes con la consecuente ampliación de la jornada laboral y la disminución de los períodos de veda, la posibilidad de transportar las mezclas a mayores distancias incrementando el radio de acción de las plantas asfálticas,

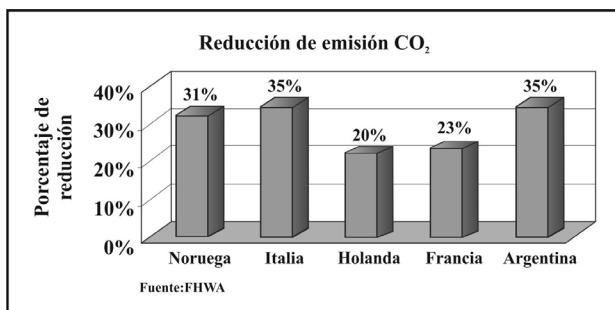


Figura 1. Reducción de emisiones de CO₂ respecto de las mezclas en caliente.

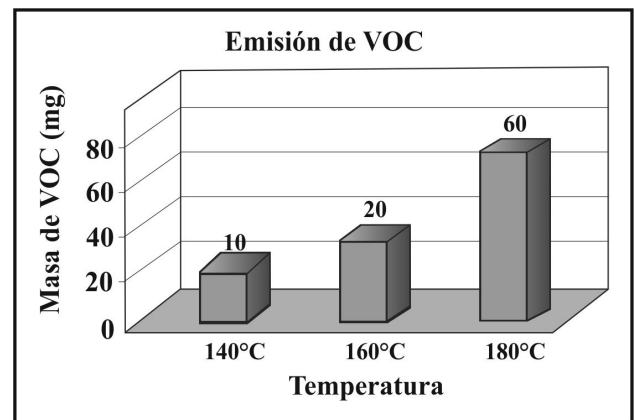


Figura 2. Reducción del consumo de fuel/ton respecto de las mezclas en caliente.

la posibilidad de lograr densidades de proyecto con menor número de pasadas incrementando el rendimiento diario y permitiendo la apertura al tránsito de espesores importantes.

Por otro lado, mejora la performance de las mezclas por una menor alteración del asfalto ya que se lo somete a menores temperaturas produciendo un menor grado de oxidación. En la figura 3 se muestra la variación del índice de durabilidad en función de las temperaturas de trabajo, como medida de la rigidización que sufre el ligante asfáltico durante la fabricación de las mezclas.

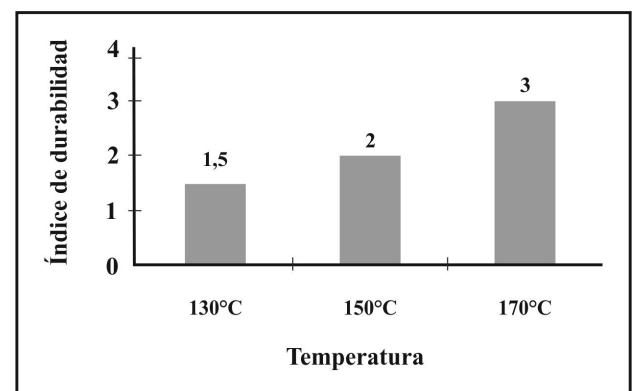


Figura 3. Índice de durabilidad en función de las temperaturas de trabajo.

Además de las ventajas mencionadas, se asocian con las mezclas tibias importantes ventajas en relación a la seguridad laboral. Las disminuciones en las temperaturas de trabajo generan disminución del riesgo laboral asociado a quemaduras y exposición de humos, fundamentalmente los VOC (compuestos orgánicos volátiles), Figura 4.

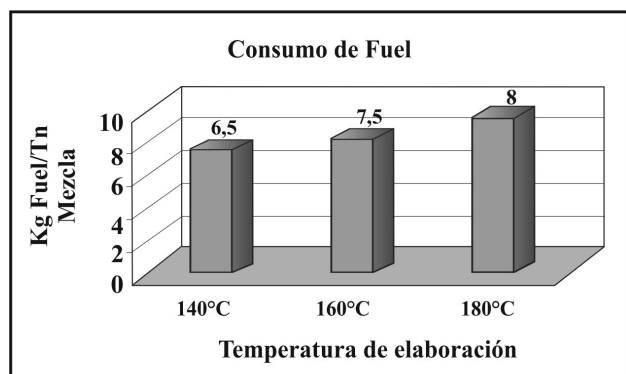


Figura 4. Emisiones de VOC en función de las temperaturas de trabajo.

MEZCLAS TIBIAS TECNOLOGÍAS, DISEÑO Y PRODUCCIÓN

Marcozzi R. G.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías sustentables que describiremos son soluciones para la preparación de mezclas asfálticas a menor temperatura con la finalidad de obtener una reducción de energía, de emisiones, de polvo y de humos sin afectar significativamente su comportamiento mecánico ni su durabilidad.

TECNOLOGÍAS DE MEZCLAS TIBIAS

Una forma de clasificar estas tecnologías puede ser la siguiente, las que usan agua y las que usan ceras o aditivos orgánicos.

TECNOLOGÍAS QUE USAN AGUA

El principio de funcionamiento de esta metodología es el espumado: son procesos mediante los que se aumenta la superficie específica del asfalto, disminuyendo así su viscosidad aparente. Cuando el agua fría es puesta en contacto con el asfalto caliente el intercambio térmico genera vapor de agua que espuma al asfalto. La espuma de betún hace que la cobertura de los agregados sea más fácil.

Para diseñar el asfalto espumado se utilizan dos parámetros, la relación de expansión y la vida media de la espuma. La relación de expansión se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado por la espuma y el volumen inicial del asfalto. La vida media es el tiempo en segundos en que la espuma pierde el 50 % del volumen máximo alcanzado.

Una mayor relación de expansión genera mejor mezclado, por otra parte, una mayor vida media nos permite mayor tiempo para el mismo. Pero como se ve en la figura 2, a mayor relación de expansión, menor vida media, por

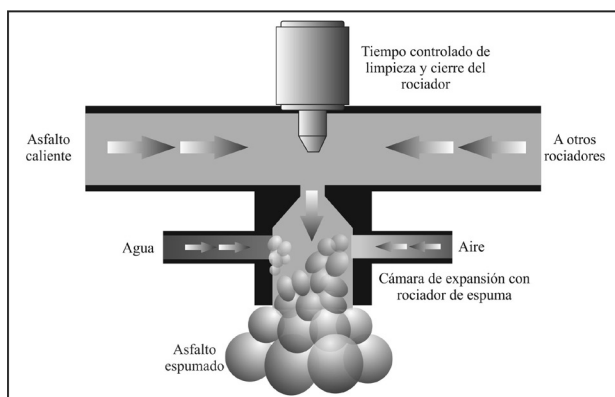


Figura 1. Proceso de espumado del ligante asfáltico

lo que estas variables definen un porcentaje de agua que optimiza el diseño.

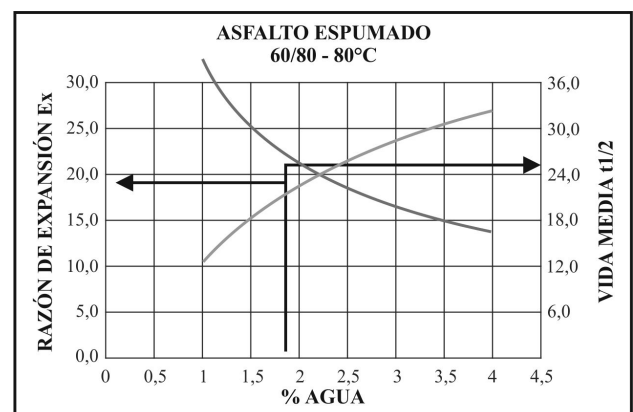


Figura 2. Diseño del porcentaje óptimo de agua

WAM Foam

El proceso WAM Foam, patentado por la compañía Shell, ha sido diseñado para producir y colocar mezclas asfálticas a temperaturas más bajas que las mezclas convencionales, conduciendo a importantes beneficios ambientales en la planta asfáltica y durante las operaciones de colocación de las mezclas.

Las temperaturas más bajas de operación, se logran combinando un asfalto duro con un grado más blando. El asfalto blando es mezclado con el agregado pétreo realizando una precobertura. Luego se introduce un asfalto duro en la mezcla bajo la forma de espuma, polvo o emulsión para lograr el grado de consistencia deseado.

El proceso Shell WAM Foam conduce a una reducción de temperatura de aproximadamente 50 °C y una muy considerable disminución de emisiones, polvo y humos. Debido a la disminución de las temperaturas el proceso conduce a un ahorro en el consumo de energía de entre 25 y 35 %. A continuación se presentan esquemáticamente los procesos convencional y WAM Foam.

En comparación, en una mezcla en caliente se secan completamente los agregados para incorporar luego el asfalto con la consistencia necesaria para el mezclado efectivo.

En el proceso WAM Foam, la temperatura de secado es inferior, se mezcla con asfalto blando que requiere menores temperaturas y luego se agrega el asfalto duro.

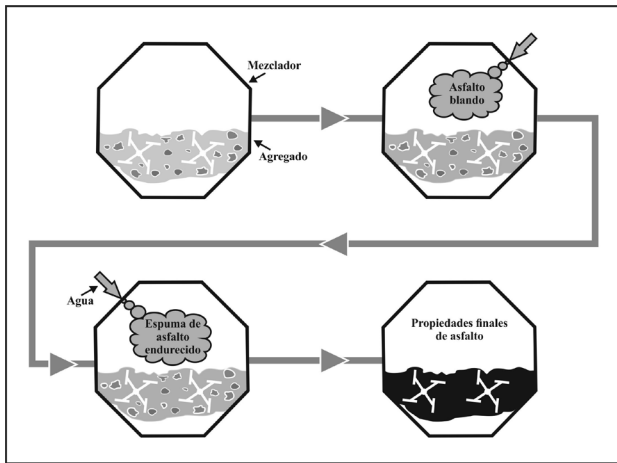
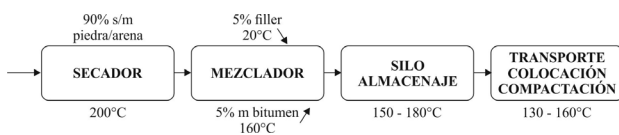
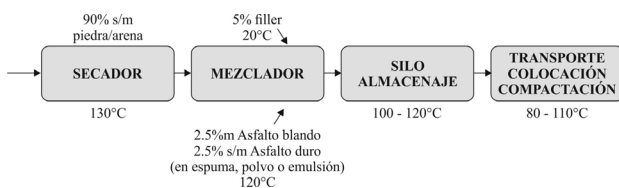


Figura 3. Sistema WAM Foam

Sistema convencional



Sistema WAM Foam



Con la incorporación de 2% de agua se consigue un volumen de espuma de 10 a 20 veces mayor que el volumen de ligante. El ahorro de energía radica en la temperatura de agregados más baja, pero requiere la modificación de la planta convencional de manera de incorporar el sistema de inyección de agua y cámara para espumar el asfalto.

Zeolitas sintéticas

Son silicatos de aluminio hidratado con estructura cristalina con gran vacancia que tienen la capacidad de perder y absorber agua sin dañar su estructura cristalina.

Tienen gran espacio en su estructura para entrapar agua. Estos espacios están interconectados mediante canales de diferentes tamaños. El agua la pierden por calentamiento.

El agua liberada produce una pequeña película entre el asfalto y el agregado mejorando la trabajabilidad de la mezcla.

Se agrega poco antes del asfalto en porcentajes del orden del 0.3% en peso de la mezcla. Produce un espumado controlado y el ahorro de energía radica también en la temperatura de agregados más baja.

Mezclas EBT o Asfalto de baja energía (LEA)

Es un proceso patentado basado también en la capacidad

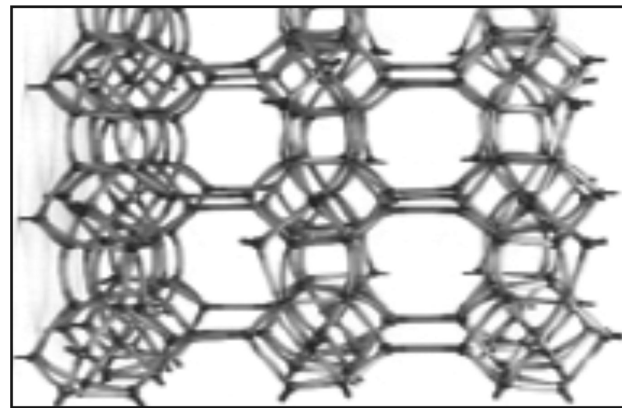


Figura 4. Estructura cristalina de la Zeolita

del asfalto caliente en formar espuma cuando se pone en contacto con la humedad residual de los áridos.

El método consiste en agregar todo el porcentaje de asfalto a las temperaturas especificadas al agregado grueso seco, luego se incorpora el agregado fino húmedo que espuma al asfalto. Se alcanza un equilibrio térmico entre el agregado, el asfalto y el agua residual condensada que se dispersa en la masa del asfalto y asegura la trabajabilidad de la mezcla.

El ahorro de energía coincide con la energía necesaria para secar los agregados finos. Puede realizarse en plantas continuas y discontinuas.

Requieren mayor compactación para expulsar el agua residual por lo que el ahorro energético dependerá del estricto control de la mínima humedad que garantice la trabajabilidad.

Puede requerir compactación con neumáticos para que la mezcla adquiera la cohesión necesaria.

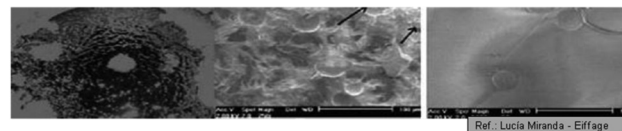


Figura 5. Agua dispersada en la mezcla

Doble Barril “Green System”

La compañía Astec ha desarrollado este sistema “verde” para producir una mezcla con asfalto espumado en su planta de doble tambor. La inyección de agua se realiza a través de una serie de boquillas que lo ponen en contacto con el asfalto caliente. La espuma producida causa un aumento en el volumen del asfalto ayudando a recubrir los agregados a temperaturas en el rango de 110 y 130°C, frente a las tradicionales temperaturas de 147 y 170°C.

En la figura 7 se presenta una vista del equipamiento.

Variante del espumado

Una variante del mismo es diluir surfactante en el agua e inyectarlo en la línea del asfalto, como se ve en la figura 8. El surfactante reduce la volatilidad del proceso de espumado e incrementa la vida media de la espuma o el tiempo de trabajo de la espuma resultante.

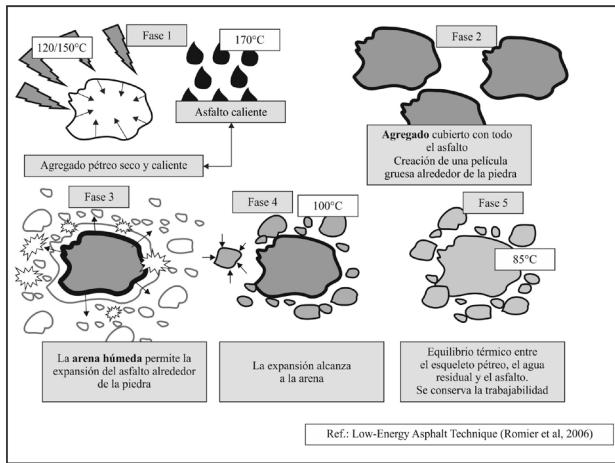


Figura 6. Esquema de funcionamiento de mezclas LEA

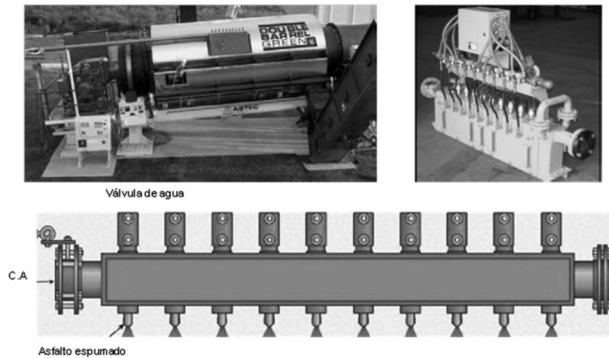


Figura 7. Double Barrel "Green System"

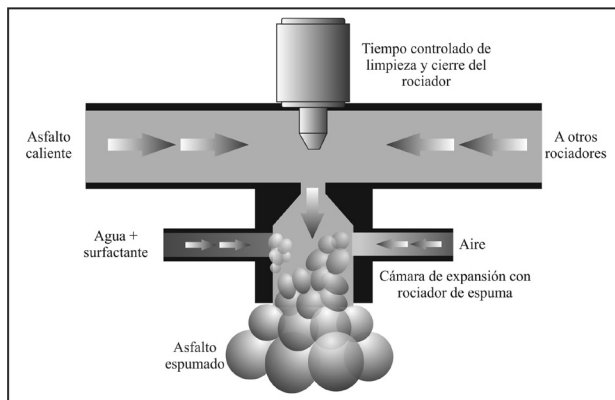


Figura 8. Inyección de agua con surfactante

TECNOLOGÍAS QUE USAN ADITIVOS

Esta categoría de tecnologías puede subdividirse en dos grandes grupos, los aditivos que modifican la viscosidad a las temperaturas de mezclado, como las Ceras Fischer Tropsch o la Cera Montana, y los aditivos que actúan sobre la trabajabilidad y compactabilidad de las mezclas, como las amidas de ácidos grasos y los tensoactivos.

Aditivos que modifican la viscosidad

Son fluidificantes del asfalto, es decir, reducen la viscosidad del asfalto por encima de su punto de fusión lo que permite la envuelta de los agregados a menores temperaturas que las previstas para el asfalto original.

Cada aditivo modifica la curva Viscosidad-temperatura de un modo concreto y la magnitud y tipo de efecto ejercido

sobre la reología depende del tipo y cantidad de aditivo utilizado.

Los aditivos más conocidos son:

a) Parafinas del petróleo: reduce la rigidez de los asfaltos, la temperatura máxima y las temperaturas de trabajo. Tienen puntos de fusión entre 50 y 70 °C. Tienen muy malos efectos sobre el asfalto para pavimentación. El punto de fusión se encuentra cerca de las temperaturas altas de servicio, por lo que disminuye su resistencia al ahuellamiento. A las temperaturas más bajas de servicio

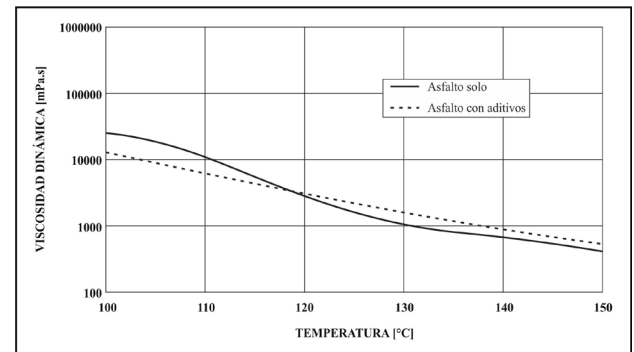


Figura 9. Carta de viscosidad

rigidiza notablemente al ligante, por lo que lo hace más susceptible a la fisuración térmica, Figura 10. Este aumento de rigidez también afecta el comportamiento a fatiga a temperaturas intermedias.

b) Parafinas Fischer Tropsch: es una cera sintética obtenida del proceso de gasificación del carbón por el método Fischer Tropsch. Estas ceras orgánicas son de cadena hidrocarbonada larga a diferencia de las ceras de petróleo que son cortas y son consideradas indeseables en el asfalto. Proveen elevada rigidez en todo el intervalo de temperaturas de servicio y caída alrededor de 95-115°C, Figura 11, lo que permite reducir las temperaturas de trabajo de las mezclas del orden de unos 20°C y además mejorar las propiedades mecánicas.

c) Cera Montana: son encontradas en Alemania en depósitos de carbón tipo lignito y están constituidas por hidrocarburos de alto peso molecular. De igual forma que las ceras Fischer Tropsch, las ceras Montana mejoran la

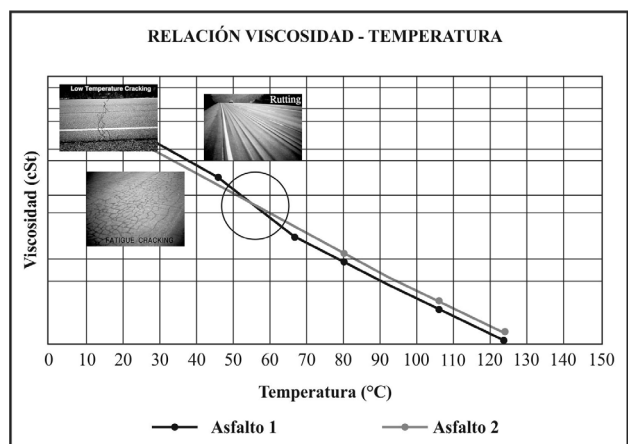


Figura 10. Carta de viscosidad de asfaltos con parafina de petróleo.

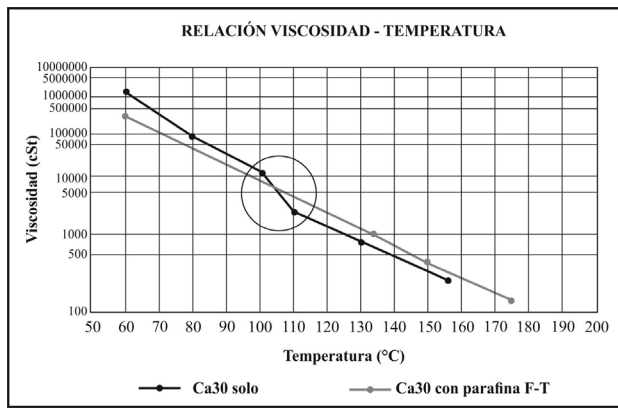


Figura 11. Carta de viscosidad de asfalto con parafina F-T.

trabajabilidad y compactabilidad de las mezclas asfálticas además de incrementar su resistencia al ahuellamiento.

Además de la forma característica de la curva viscosidad-temperatura, puede reconocerse la adición de parafinas sintéticas en el hecho de que la penetración se reduce y el punto de ablandamiento se incrementa, ver tabla 1.

Aditivos que mejoran la trabajabilidad y compactabilidad de las mezclas

Son aditivos de última generación.

Una buena envuelta requiere que la energía necesaria para formar la interfaz ligante-agregado sea mínima. El surfactante o tensoactivo reduce la tensión superficial del asfalto, responsable de la tendencia a la forma esférica de las gotas. Si se reduce la tensión superficial, se reduce la fuerza que se opone al mojado.

Estos aditivos son mezclas de Amidas de ácidos grasos (AAG) y tensoactivos que:

- a) Reducen la tensión superficial del asfalto.
- b) Mejoran la lubricación entre el asfalto y los agregados.
- c) Han sido diseñados además para producir importantes mejoras en la adherencia y la cohesión de las mezclas

Estos productos, junto con los llamados modificadores químicos que no emplean agua para producir espuma, tienen la particularidad de no modificar apreciablemente las propiedades reológicas de los asfaltos, es decir ni su viscosidad, como se muestra en la figura 14 ni tampoco su clasificación por grado de performance PG.

Tabla 1. Variación de parámetros en asfalto con parafina F-T.

	Original	+ 3% Aditivo
Penetración a 25 °C	60	42
Punto de Ablandamiento, °C	50	77
Viscosidad a:		
60 °C, dPa.s	5900	26400
80 °C, dPa.s	535	507
100 °C, dPa.s	52	36
135 °C, dPa.s	5.2	3.3
160 °C, dPa.s	2.0	1.2

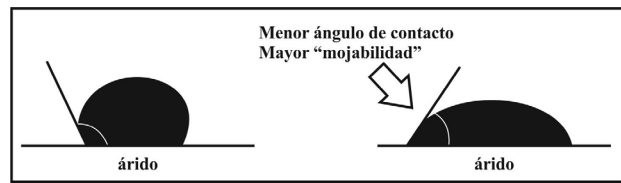


Figura 12. Tensión superficial del asfalto

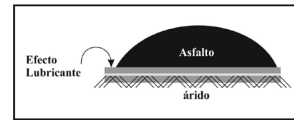


Figura 13. Efecto lubricante entre asfalto y agregados

El efecto de los aditivos puede evaluarse midiendo justamente las propiedades que mejoran. Por ejemplo, midiendo la trabajabilidad mediante un trabajabilómetro, Figura 15, que mide continuamente la temperatura y el torque de la paleta mezcladora. A mayor torque, menor trabajabilidad.

Para medir la compactabilidad, se están evaluando diferentes parámetros como el Índice de Esfuerzo de compactación, que mide el área bajo la curva de esfuerzo de compactación en el compactador giratorio Superpave, Figura 16.

Para evaluar la resistencia mejorada frente al daño por humedad se destaca el ensayo Hamburgo, ensayo muy severo que combina sensibilidad al agua con deformación y temperaturas elevadas de servicio. En la figura 17 se ve que la mezcla con el aditivo B mejora su comportamiento respecto de la misma sin aditivo cuando es fabricada a temperaturas reducidas, casi igualando el comportamiento

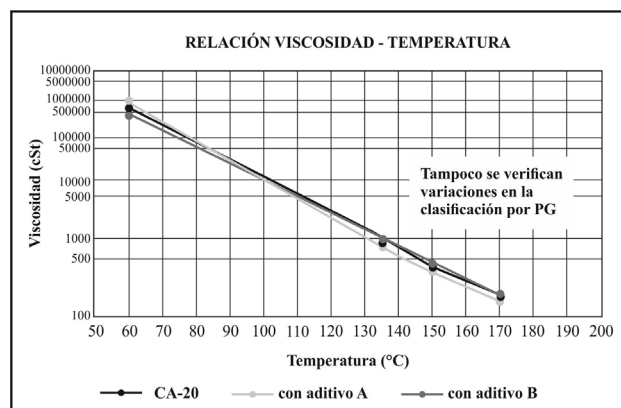


Figura 14. Carta de viscosidad de asfaltos con aditivos tensoactivos

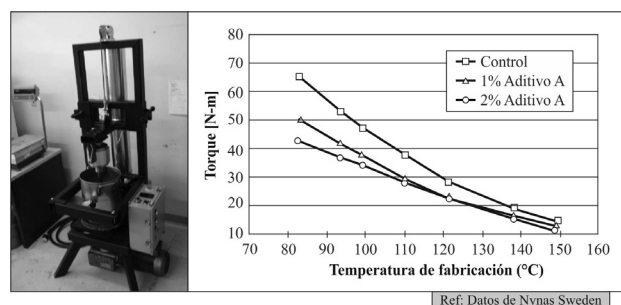


Figura 15. Trabajabilómetro UMA

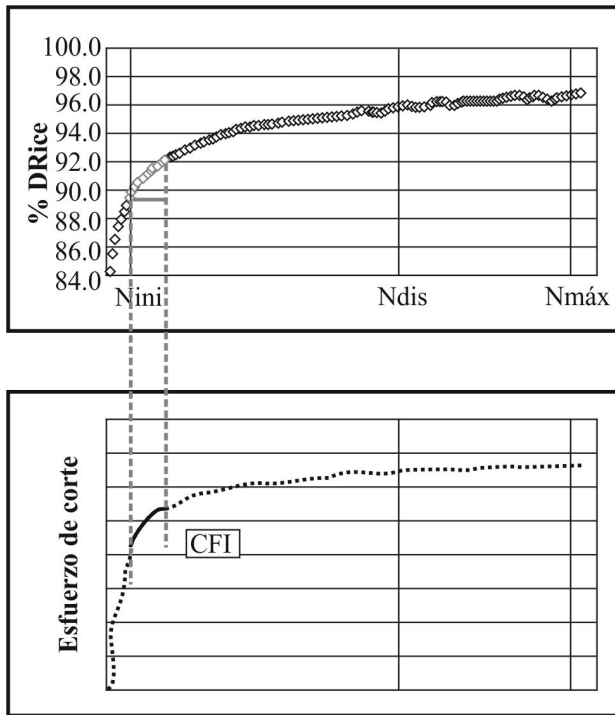
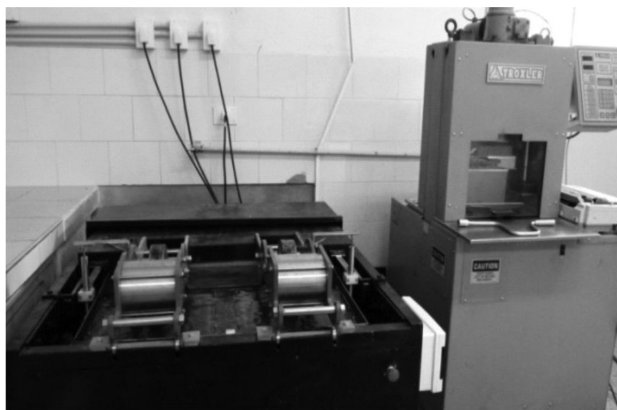


Figura 16. Curvas de compactación

de la mezcla asfáltica en caliente.

También se reconocen mejoras en la resistencia conservada luego del daño por humedad inducido por el congelamiento de probetas saturadas a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 16 horas seguidas de la inmersión de las mismas en agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para una mezcla con asfalto convencional de buen comportamiento frente al daño por humedad, una reducción de las temperaturas implica importantes



Equipo HWTT y Compactador Giratorio - LEMIT

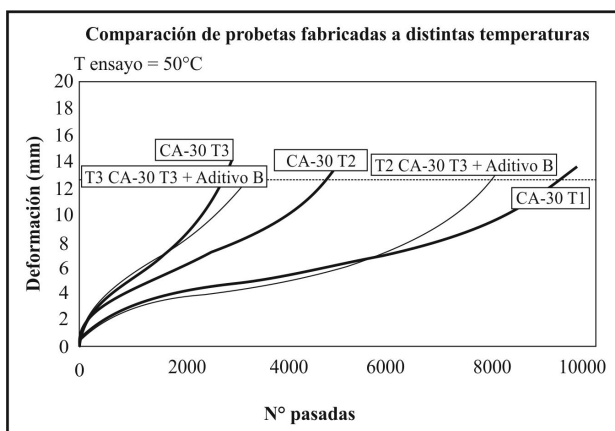


Figura 17. Curvas de deformaciones en ensayo Hamburgo

reducciones en su resistencia conservada. En el caso del aditivo B se consiguen importantes reducciones de las temperaturas sin disminuir su resistencia al daño por humedad, Figura 18.

EVALUACIÓN Y DISEÑO

El objetivo principal de la tecnología de mezclas tibias es lograr verificar la reducción de temperaturas de trabajo igualando o superando en servicio el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente tradicionales.

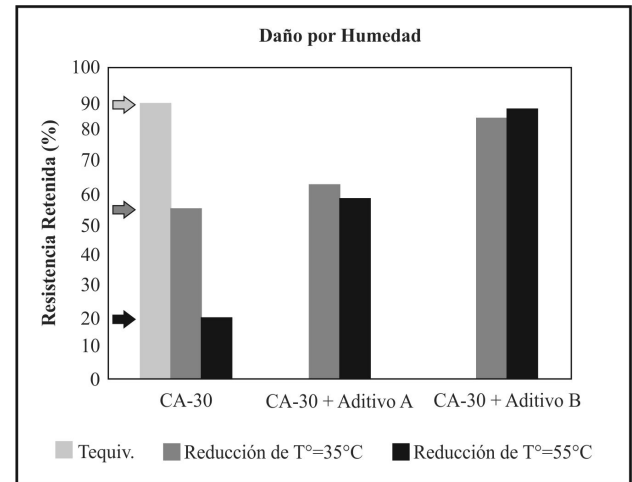


Figura 18. Daño por humedad en mezclas en caliente y mezclas tibias

Las tecnologías de las mezclas tibias pueden aplicarse a cualquier tipología de mezcla asfáltica, de allí que los métodos de diseño que se emplean son los mismos que los conocidos para las mezclas convencionales, con la lógica diferencia de las temperaturas a considerar.

Al margen del aspecto anterior, es importante incluir ciertos ensayos racionales no contemplados en los métodos de diseño convencionales que pueden resultar herramientas importantes para optimizar los diseños.

En cuanto a los parámetros volumétricos, el objetivo es verificar la principal virtud que las mezclas tibias presentan sobre las mezclas asfálticas convencionales, es decir, lograr los parámetros volumétricos exigidos en las especificaciones luego de la compactación trabajando con las temperaturas reducidas. Esto se logra compactando en laboratorio con equipos que simulan el amasado al que es sometida la mezcla durante la construcción del pavimento, tales como el Roller Compactor o el Compactador Giratorio. En general, no es posible apreciar esta ventaja en la densificación cuando se compacta con el compactador Marshall debido a que densifica mediante impactos.

Los parámetros mecánicos más importantes a verificar son el comportamiento frente a las deformaciones permanentes, fundamentalmente porque el ligante presentará menor rigidez al momento de entrar en servicio que el ligante de las mezclas en caliente convencionales. Los ensayos que se están empleando con mayor frecuencia son el Wheel tracking test (WTT) y el Hamburgo wheel tracking test (HWTT).

Las menores temperaturas de trabajo pueden conducir a contenidos residuales de humedad en los áridos, sobre

todo en agregados con absorciones importantes, que luego compliquen el comportamiento de las mezclas al interferir en la adherencia y la cohesión. Para ello se estudia el comportamiento en el HWTT o mediante el ensayo de daño por humedad con el ciclo de congelamiento.

Un parámetro muy útil para aplicar durante la etapa de diseño y para el control en campo es el módulo de rigidez en tracción indirecta (ITSM).

Generalmente se adoptan las mismas especificaciones que las mezclas asfálticas en caliente tradicionales, con la única diferencia de las temperaturas de trabajo. En Noruega y Alemania se diseñan como mezclas convencionales en caliente, salvo recomendaciones sobre elaboración y aplicación. En Francia las especificaciones convencionales se complementan con ensayos de performance. En EE.UU. se encuentra en estudio la determinación del contenido óptimo de asfalto.

PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Si bien depende de qué tecnología de mezclas tibias se considere, en general no son necesarios recursos diferentes a los empleados con las mezclas en caliente tradicionales para los procesos de elaboración, transporte, colocación y compactación de las mezclas tibias, si bien pueden requerirse adaptaciones de la planta para la incorporación de aditivos orgánicos o el sistema de espumado del asfalto. En la siguiente foto, Figura 19, se puede apreciar en planta cómo la disminución de la temperatura de fabricación de una mezcla asfáltica reduce notablemente la producción de humos.

CONSIDERACIONES FINALES

La reducción en el consumo de combustibles usado en la producción de las mezclas podría tener un fuerte impacto en la industria de la construcción.

Los beneficios de estas tecnologías, en términos de ahorro de energía y mejoras en la calidad de vida por menos emisiones, son logros muy promisorios.

En la bibliografía se las considera de comportamiento satisfactorio. En nuestro país nos encontramos estudiando varios tramos de prueba realizados con diferentes tecnologías de mezclas tibias.

Es importante destacar que lo importante no es elegir una tecnología en particular, sino lograr reducir las temperaturas de una manera eficiente.



Figura 19. Reducción de emisiones en mezclas tibias

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LA COMPACTABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS A BAJAS TEMPERATURAS

Agnusdei J., Marcozzi R., Morea F.

La disminución de las temperaturas de preparación y colocación de mezclas asfálticas en caliente tiene por finalidad lograr una disminución de la energía consumida en el proceso y por lo tanto reducir las emisiones producidas, teniendo como principal premisa que no se vean afectadas las propiedades y consiguientes prestaciones de la mezcla producida.

Uno de los artificios utilizados para la disminución de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asfálticas consiste en el empleo de distintos tipos de aditivos, tales como ceras, zeolitas, incorporación de agua, agentes tensoactivos, etc.

En este trabajo nos centraremos en el uso de agentes tensoactivos. Estos aditivos favorecen el recubrimiento de los áridos por parte del ligante asfáltico, aún a temperaturas más bajas que las convencionales donde el asfalto posee una mayor viscosidad. Estos aditivos, además de ayudar a obtener un buen recubrimiento de los áridos reduciendo la tensión superficial entre los áridos y el ligante disminuyendo el ángulo de contacto entre ambos, también actúan como lubricantes mejorando la trabajabilidad de la mezcla.

Este trabajo es continuación de una serie de experiencias que se vienen llevando a cabo en el LEMIT sobre este tema desde hace unos años, se estudian dos aditivos del tipo de los tensoactivos en mezclas preparadas con asfaltos convencionales y modificados con polímeros del tipo SBS. Se trata de poner en evidencia la mejora en la trabajabilidad y compactabilidad de las mezclas preparadas a bajas temperaturas, mediante el empleo del Compactador giratorio del SHRP (AASHTO T312) y del Compactador dinámico “Roller compactor” (EN 12697: 33). Además el trabajo se complementa midiendo el efecto que tiene la disminución de las temperaturas de preparación y colocación de las mezclas, sobre las posibles pérdidas de adherencia entre los agregados pétreos y el ligante asfáltico, mediante la técnica de la rueda de Hamburgo (AASHTO T324).

Introducción

En los últimos años se han desarrollado una serie de aditivos químicos que adicionados a los asfaltos y

mezclas asfálticas permiten reducir las temperaturas de preparación y colocación de las mezclas elaboradas con ellos, lo que ha dado origen a las llamadas mezclas tibias o WMA (Warm Mix Asphalt).

Las mezclas tibias son aquellas mezclas que pueden ser preparadas, colocadas y compactadas a menores temperaturas, entre 20 y 40°C menos, que las típicas mezclas asfálticas en caliente.

Según autoridades de la National Asphalt Paving Association (NAPA) de los EE.UU., dentro de los próximos 5 años las mezclas asfálticas preparadas en caliente se deberán hacer a temperaturas más bajas que las que hoy se están utilizando. Con esto se logrará atenuar el impacto ecológico que producen las actuales técnicas de preparación de mezclas asfálticas.

La reducción de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asfálticas se traduce en una serie de ventajas tales como la disminución del consumo de energía y de emisiones en la planta asfáltica, el incremento de las distancias de transporte de la mezcla, el aumento de los tiempos de colocación y mejoras en la trabajabilidad y compactabilidad. Esta reducción debe ir acompañada del logro de una calidad adecuada de las mezclas procesadas a menores temperaturas.

Para conseguir la reducción de las temperaturas de trabajo se recurre al uso de distintas tecnologías tales como aditivos químicos del tipo ceras o parafinas, que modifican la reología de los ligantes asfálticos (Gil et al., 2009). Estas ceras o parafinas se encuentran en estado sólido a temperaturas medias y se funden a altas temperaturas, donde se lleva a cabo el mezclado, disminuyendo la viscosidad del ligante, facilitando la cobertura de los agregados pétreos. Existen también aditivos que aumentan la superficie específica del asfalto mediante la formación de espuma ya sea mediante la incorporación de agua y aire a presión, arena húmeda o productos tipo Zeolitas que contienen agua en su estructura la cual es liberada al ser calentadas con los agregados pétreos, formando espuma. Finalmente tenemos los aditivos llamados modificadores de asfaltos “químicos”, que no involucran la adición de agua al sistema, basados en la formulación de tensoactivos amínicos que ayudan al buen recubrimiento de los áridos reduciendo la tensión superficial entre los

áridos y el asfalto, disminuyendo en consecuencia el ángulo de contacto entre ambos (González et al., 2010). Estos aditivos también pueden actuar como lubricantes favoreciendo la trabajabilidad de la mezcla (Gil Redondo et al. 2010) y mejorando considerablemente la adhesión entre los agregados y el asfalto.

En el LEMIT se vienen desarrollando estudios de laboratorio sobre mezclas asfálticas tibias analizando varios tipos de aditivos de distinta naturaleza química tratando de poner en evidencia su grado de efectividad.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la trabajabilidad y compactabilidad de las mezclas al disminuir las temperaturas de colocación de las mismas preparadas en el laboratorio. Para ello se han estudiado aditivos químicos del tipo tensoactivos, los que según sus fabricantes no modifican la reología de los asfaltos, es decir no producen modificaciones en su viscosidad a las temperaturas de mezclado. Se ha puesto en evidencia los efectos que producen en la compactabilidad mediante ensayos que permitan resaltar estas mejoras.

De esta forma se pretende caracterizar en el laboratorio distintos tipos de aditivos, concentraciones y temperaturas más efectivas de utilización, es decir, tratar de resaltar su grado de efectividad.

Medida de la trabajabilidad de las mezclas

Entre los desarrollos citados por la bibliografía acerca de equipos destinados a medir en laboratorio la trabajabilidad de las mezclas asfálticas, los primeros estudios se remontan al trabajo de Marvillet et al (1979), en el que la trabajabilidad de las mezclas es evaluada introduciendo una paleta que gira dentro de una mezcla suelta mantenida a una determinada temperatura, midiendo el torque necesario para mantener girando a la paleta a una determinada velocidad. A mayores valores del torque, más pobre es la trabajabilidad. Posteriormente se realizaron modificaciones a este equipo mejorando sus características de funcionamiento (Gudimettla et al., 2003)

En nuestro caso particular trataremos de utilizar los equipos disponibles en el laboratorio tales como el compactador dinámico (Roller compactor) y el compactador giratorio

Compactador dinámico (Roller compactor)

Este equipo es utilizado para moldear placas de mezcla asfáltica para usarse en los ensayos de rueda cargada o bien aserrarse para la fabricación de vigas para ensayos de fatiga. En él, una cantidad de mezcla prefijada es compactada sobre un molde rectangular y sometida a la acción de una carga generada por un rodillo liso o equivalente. El rodillo se desplaza sobre la mezcla generando un efecto de amasado a velocidad constante. Es el que más se asemeja al procedimiento en obra y permite reproducir una amplia gama de presiones de compactación similares a la de los equipos de campo. A partir de este equipo es posible obtener probetas otorgando una determinada energía de compactación controlada o bien hasta que se obtiene un volumen especificado y por tanto un volumen de vacíos determinado.

La masa a colocar para una probeta es función de la

densidad máxima de la mezcla, de las dimensiones del molde, del espesor de la placa requerido y del porcentaje de vacíos buscado. Esta masa se vuelca sobre el molde de compactación sin segregarse y se procura su distribución uniforme previo a la compactación.

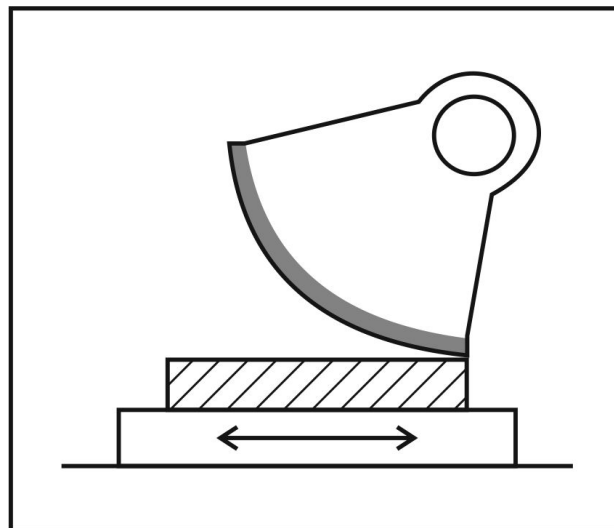


Figura 1. Compactador dinámico (Roller compactor) EN 12697-33

$$M = 1 \times 10^3 \cdot L \cdot l \cdot e \cdot \rho_{\max} \cdot \left(\frac{100 - v}{100} \right)$$

Donde M es masa de la mezcla en Kg; L, l y e las dimensiones del molde en cm, ρ_{\max} densidad máxima de la mezcla en Kg/m³ y v el porcentaje de vacíos.

Este tipo de compactación figura en la normativa europea EN 12697-33. En el presente trabajo se utiliza esta metodología para analizar la compactabilidad de una mezcla densa en diferentes condiciones (temperaturas de compactación inferiores a las convencionales con y sin aditivos incorporados al asfalto para mejorar la trabajabilidad).

Compactador giratorio

Las condiciones de compactación (AASHTO T312) utilizadas en el sistema de diseño Superpave son las siguientes: el pistón de carga aplica 600 kPa de presión y el molde es inclinado 1.25 grados respecto de la vertical antes de iniciar el giro de su base a 30 r.p.m

Uno de los parámetros utilizados para evaluar la resistencia a la compactación de una mezcla asfáltica es el CDI o Índice de densificación durante la compactación. Por definición, es el área bajo la curva de compactación entre el número inicial de giros, definido en las especificaciones en función del nivel de tráfico, y el 8% de vacíos en la mezcla (92% Gmm). Cuanto menores sean los valores del CDI, mejor se compacta la mezcla.

En trabajos realizados en nuestro laboratorio, se obtuvieron valores de estos parámetros para materiales locales. Todos los casos analizados dieron valores de CDI menores que 300, valor propuesto como límite superior.

Debido a la capacidad demostrada de este parámetro

asociado con la compactación para caracterizar la resistencia que presentan las mezclas a ser compactadas, en el presente trabajo se utilizaron para detectar cambios en las resistencias a la compactación de mezclas realizadas a diferentes temperaturas.

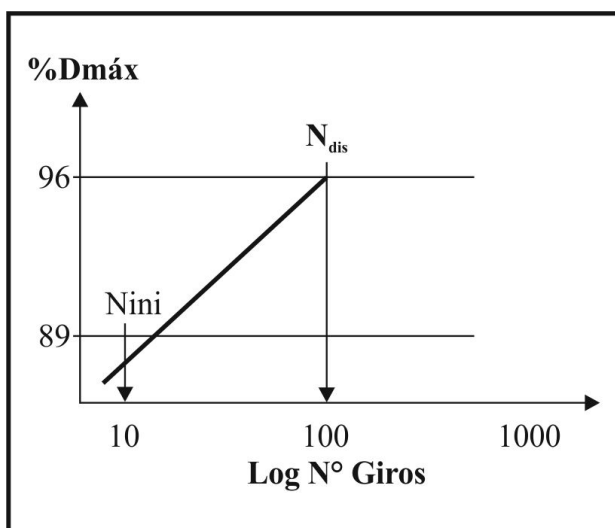
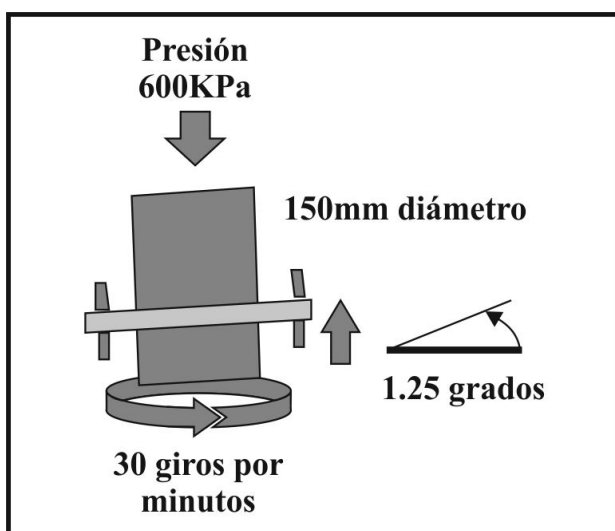


Figura 2. Esquema de compactación giratoria y curva de densificación

Desarrollo del estudio

Materiales empleados

- Aditivos

Se estudiaron tres aditivos químicos de tipo tensoactivos. Identificados como A, B y C. El aditivo A es sólido, mientras que el B y el C son líquidos.

- Mezcla

La mezcla utilizada para medir la trabajabilidad y compactabilidad fue del tipo densa con un tamaño máximo de 20mm (D-20), que responde a la siguiente curva granulométrica.

La misma fue elaborada con agregados graníticos de trituración de la provincia de Buenos Aires. La mezcla fue diseñada a través del método Marshall obteniéndose un contenido óptimo de ligante de 5 %.

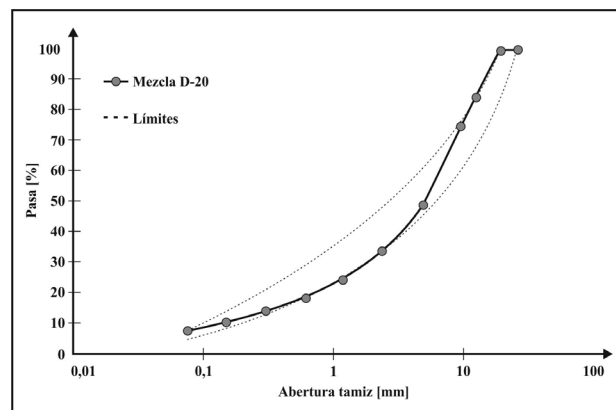


Figura 3. Curva granulométrica de la mezcla en estudio.

- Asfaltos estudiados

Para el estudio se empleó un cemento asfáltico convencional, del tipo CA 30 y un AM3 modificado con polímeros. A estos asfaltos se le adicionó 2% del aditivo A y 0.4% de los aditivos B y C, respectivamente.

En las Figuras 4 y 5, se presentan las curvas de viscosidad-temperatura de los asfaltos CA 30 y AM 3 con los distintos aditivos.

Tal como puede apreciarse los aditivos no producen variaciones significativas en las características reológicas de los ligantes que cambian apreciablemente las temperaturas de preparación y compactación de las mezclas.

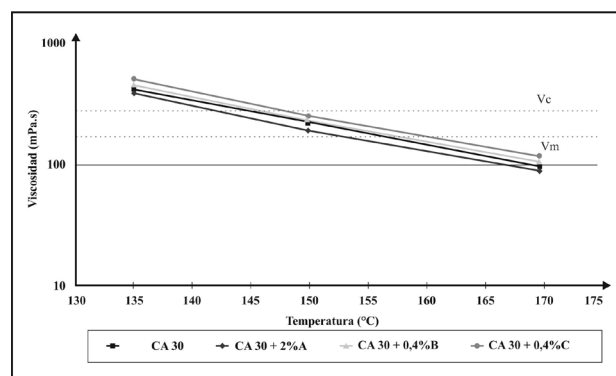


Figura 4. Curvas Viscosidad-Temperatura – Asfalto CA 30

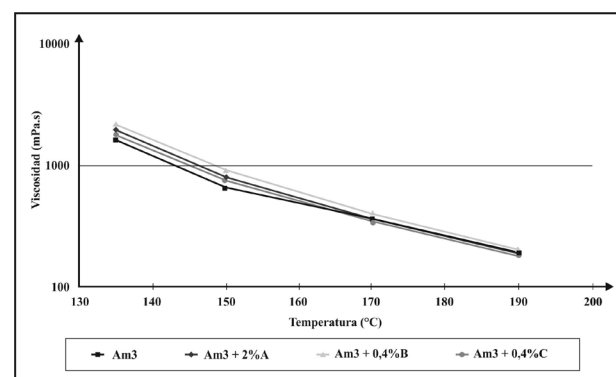


Figura 5. Curvas Viscosidad-Temperatura – Asfalto AM3

Resultados obtenidos con el compactador dinámico (Roller compactor)

Para cada una de las diferentes variantes, temperatura y aditivo, se procedió al moldeo de probetas de mezcla asfáltica en los moldes de 30 x 30 x 5 cm, con 4, 8, 16, 32 y 48 pasadas del rodillo. La cantidad de mezcla por probeta es equivalente a la necesaria para obtener una probeta de las dimensiones indicadas con la densidad Marshall de diseño de la mezcla asfáltica en condiciones convencionales, la que se mantuvo constante en todo el proceso. La presión de compactación se fijó en 2 kg/cm².

Las mezclas se prepararon a 160°C y luego fueron compactadas a 100, 130 y 150°C, aplicando las distintas energías de compactación citadas (4, 8, 16, 32 o 48 pasadas del rodillo). Las mezclas se prepararon con el asfalto original y los modificados con los aditivos A, B y C. Sobre las probetas se determinaron densidad y % de vacíos.



- Asfalto CA 30

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras, 6, 7 y 8, donde se ha graficado la variación de la densidad frente a la energía de compactación, representada por el N° de pasadas del compactador a las diferentes temperaturas de compactación.

A 150° C se observa que las mezclas con aditivos alcanzan la densidad de Marshall de referencia, determinada previamente e igual 2,438 g/cm³, con una energía de compactación de alrededor de 16 pasadas mientras que la mezcla convencional lo logra con 22 pasadas. Se aprecia que aún a esta temperatura los aditivos contribuyen para lograr una mejora en la compactabilidad.

En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos a 130°C. Como puede ser apreciado en la figura 7, los aditivos mejoran considerablemente la compactabilidad de las mezclas, distinguiéndose el mejor comportamiento del aditivo A. Mientras que para la mezcla con el asfalto solo, la densidad de referencia se alcanza con unas 30 pasadas, la mezcla con el aditivo B necesita 20 y con el aditivo A, 16 pasadas. Se considera que una disminución de 20°C en la compactación a partir de los 150°C, temperatura que puede considerarse normal y corriente en las técnicas de compactación, es un aporte aceptable por parte de los aditivos.

En la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos compactando a 100°C. Tal cual puede apreciarse a esta temperatura no se observan cambios pronunciados en el comportamiento de los tres asfaltos, tal vez porque la temperatura es demasiado baja como para que puedan funcionar los aditivos. En las diferentes mezclas elaboradas a esta temperatura fue observada la presencia de agregados sin cubrir por el ligante asfáltico.

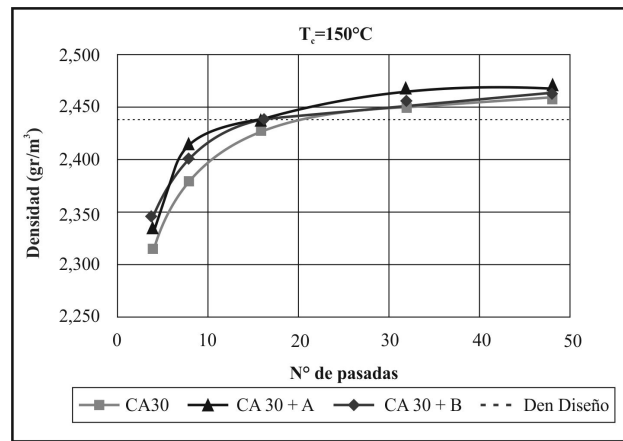


Figura 6. Compactación a 150°C – Asfalto CA 30

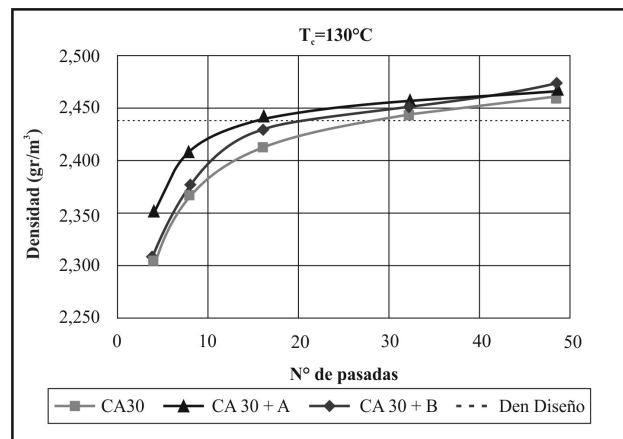


Figura 7. Compactación a 130°C.- Asfalto CA 30

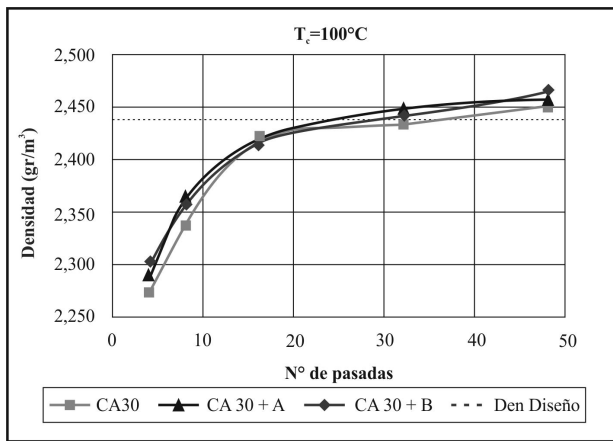


Figura 8. Compactación a 100°C – Asfalto CA 30

Asfalto AM 3

Con el asfalto modificado AM 3 se prepararon mezclas similares a las del asfalto convencional CA 30. La compactación se realizó a 130 y 165 °C. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 9 y 10.

Los resultados de las curvas de densificación no presentan mayores diferencias entre los distintos aditivos y el asfalto original

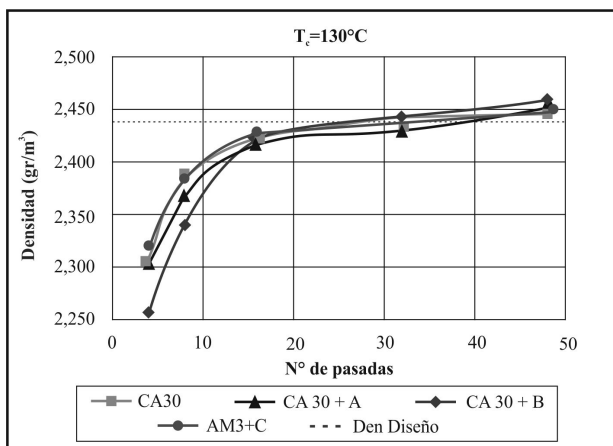


Figura 9. Compactación a 130°C – Asfalto AM 3

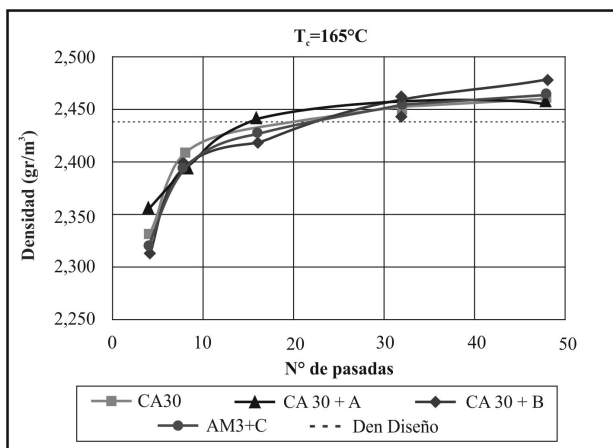


Figura 10. Compactación a 165°C – Asfalto AM 3

Resultados obtenidos con el compactador giratorio

Se compactaron probetas de la mezcla en estudio, en este caso particular una del tipo D 12, con diferentes energías definidas por los números de giros aplicados, 50, 75, 100 y 150 giros, con dos niveles de temperatura de compactación, 100 y 150 °C.

A partir de las curvas de densificación obtenidas de los datos suministrados por el compactador giratorio, tal como se muestra en la Figura 12, a título de ejemplo se calculó el CDI (Índice de densificación durante la compactación) de la mezcla con el asfalto CA 30, debiendo recordar que a medida que disminuye este índice mejor resulta la compactabilidad de la mezcla.

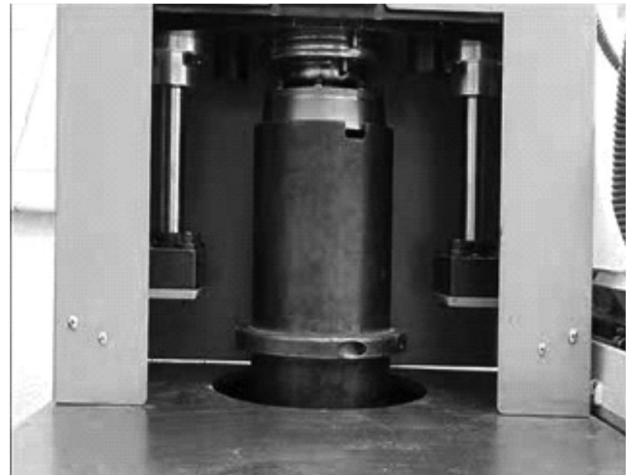


Figura 11. Compactador Giratorio Superpave

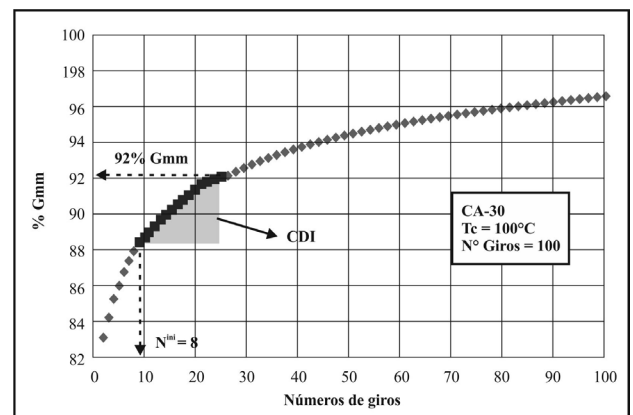


Figura 12. Curvas de densificación en función del N° de giros

Los resultados del CDI calculados para las distintas mezclas con el asfalto CA 30 y el AM 3 se presentan en las Figuras 13 y 14.

Tal como se nota en las figuras anteriores, tanto a 100 como a 150°C, los asfaltos con aditivos presentan una mejora considerable en la compactación de las mezclas, teniendo en cuenta que, a menor índice, mejor compactabilidad. Una vez más se nota que el aditivo A presenta un mejor comportamiento que los aditivos B y C.

En las figuras 15 y 16 se presentan los resultados correspondientes a las mezclas preparadas con el asfalto modificado AM 3.

Con el asfalto modificado, solamente el aditivo A presenta un efecto favorable en cuanto a la disminución del CDI, en tanto que el B y el C no parecen funcionar tan bien con este tipo de ligante, Resumiendo el aditivo A es el que presenta un buen funcionamiento tanto con el asfalto convencional CA 30 y el modificado AM 3.

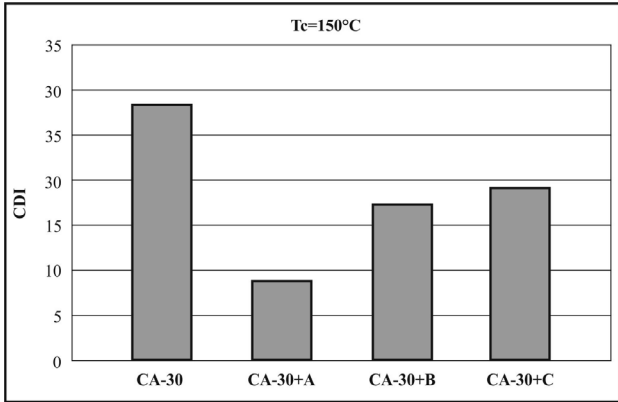


Figura 13. CDI a 150°C Mezclas con el CA 30

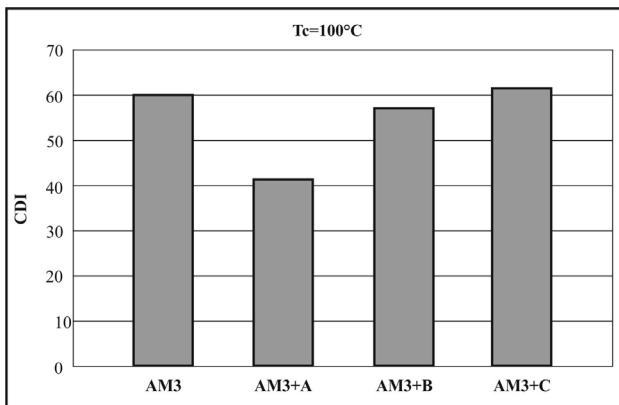


Figura 14. CDI a 100°C Mezclas con el CA 30

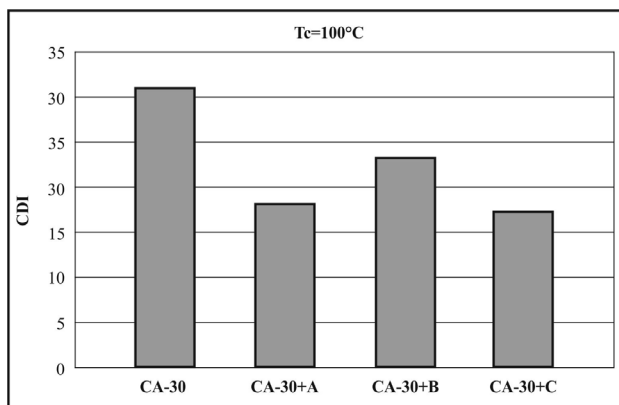


Figura 15. CDI a 100°C- Mezclas con el AM3

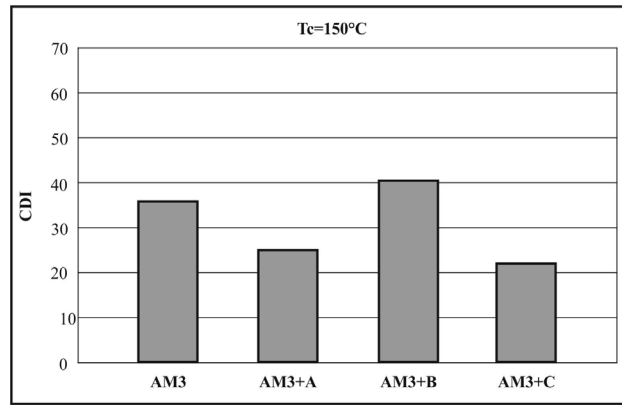


Figura 16. CDI a 150°C- Mezclas con el AM3

Ensayo de Hamburgo

Con la finalidad de verificar si estos aditivos tienen algún efecto contraproducente sobre la adherencia de estos ligantes modificados con los agregados pétreos, se realizaron ensayos de la rueda de Hamburgo (AASHTO T324) sobre aquellas mezclas que al ser densificadas presentaban un contenido de vacíos del orden del que requiere el ensayo, es decir entre 6 y 8 %. En las figuras 17 y 18 se presentan las curvas obtenidas para el asfalto AM 3 y las mezclas con aditivos compactadas a 130 y 165 °C. Los resultados correspondientes al asfalto CA 30 no han sido incluidos por algunos inconvenientes obtenidos en el procesamiento de los datos.

Tal cual se aprecia en las figuras, las curvas no presentan ningún tipo de inflexión, indicativo de problemas de adherencias en las distintas mezclas.

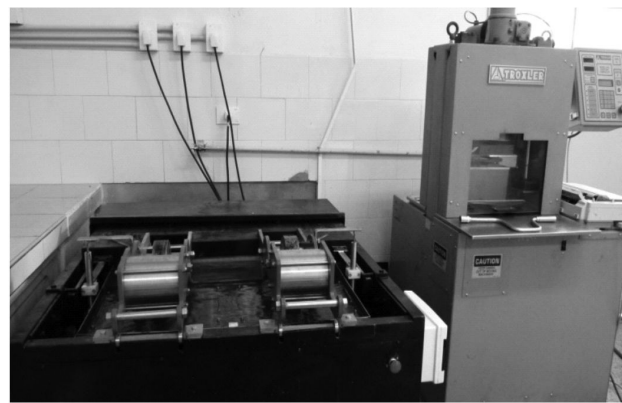


Figura 17. Equipo de ensayo de adherencia Hamburgo

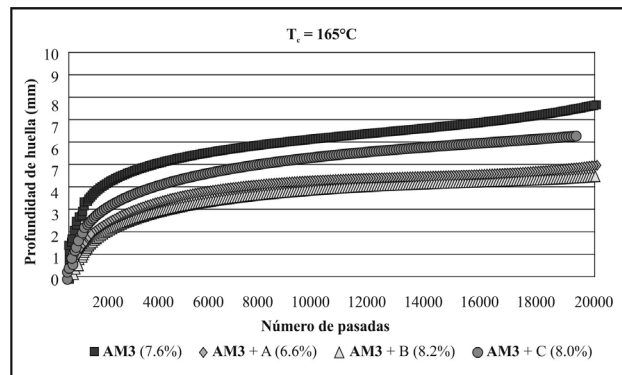


Figura 18. Ensayos de Hamburgo sobre las mezclas con el AM3 compactadas a 165 °C.

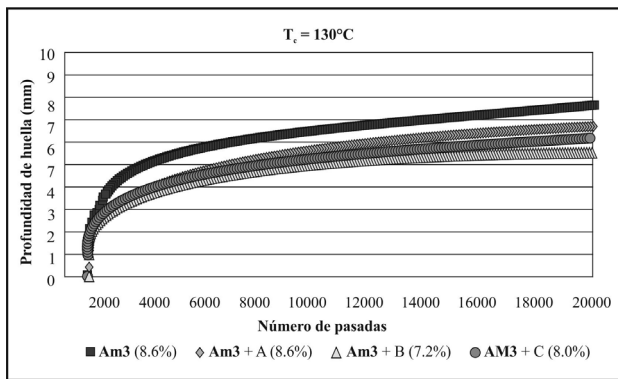


Figura 19. Ensayos de Hamburgo sobre las mezclas con el AM3 compactadas a 130 °C.

Comentarios finales

El presente trabajo propuso poner a punto una metodología que permita poner en evidencia las posibles ventajas de ciertos aditivos para trabajar con mezclas asfálticas preparadas y colocadas a temperaturas más bajas que las mezclas convencionales. En esta oportunidad se han realizado pruebas con aditivos comerciales del tipo químico surfactantes, agregados a un cemento asfáltico convencional del tipo CA 30 y un modificado con polímeros del tipo AM 3 en concentraciones recomendadas por el proveedor.

Las técnicas utilizadas para medir la compactabilidad de las mezclas fueron el compactador dinámico (Roller Compactor) y el Compactador giratorio.

Referencias

- AASHTO T 312. Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the SHRP Giratory Compactor
- AASHTO T324. Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA)
- BAHIA, MASAD, STAKSTON, DESSOUKY, BAYOMYL. Simplistic Mixture Design Using the SGC and the DSR. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, pp. 196-225, Marzo 2003.
- BAHIA H., FAHEEM. A. Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Mix Design and Production Quality Control Testing. Transportation Research Report Number E-C124, pp. 45-61, Diciembre 2007.
- GIL, S., AMOR, J., FELIPO, J., COSTA, A., CORTÉS, C., PÁEZ, A., VALOR, F., POTTI, J.J. IV Jornada Nacional de Asefma, 2009.
- GIL REDONDO, S., GONZÁLEZ LEON, J., SÓNCHER ALONSO, E. Jornada Nacional de Asefma 2010.
- GUDIMETTLA, J.M., ALLEN COOLEY.JR, RAY BROWN, E. Workability of hot mix Asphalt. NCAT Report 03-03, abril 2003.
- GONZÁLEZ, J.A., GRAMPÉ, L., BARRETO, G. Jornada Nacional de Asefma 2009.
- MARCOZZI, R.G. Utilizacion del Compactador Giratorio Superpave para evaluar la compactabilidad de las mezclas asfálticas. Memorias de la XXXIII Reunión del Asfalto, Mendoza, Argentina, Noviembre 2004.
- MARVILLET, J. BOUGALT, P. Workability of bituminous mixes. Developments of workability Meter. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 48, 1979.
- UNE EN 12697-33. Bituminous mixture: test methods for hot mix asphalts, part 33: specimen prepared by roller compactor. 2003.

Los resultados obtenidos muestran que es posible medir comparativamente la eficiencia de los aditivos empleados para disminuir las temperaturas de compactación de las mezclas asfálticas.

Si bien en este caso particular se empleó una sola concentración de aditivo, es posible que la metodología desarrollada permita evaluar la mayor o menor eficiencia de estos aditivos variando su concentración en el asfalto.

Con una reducción de 20°C en el ensayo con el Roller compactor se logran muy buenos resultados en la densificación de las mezclas, con el empleo de aditivos.

Los dos métodos empleados resultan útiles para evaluar en laboratorio el grado de trabajabilidad o compactabilidad de las mezclas asfálticas a distintas temperaturas y poder poner en evidencia la eficiencia de los aditivos que mejoran esta propiedad.

Los resultados obtenidos con el compactador giratorio parecerían que reflejan mejor que el Roller compactor, las bondades de los aditivos en cuanto a su mejora en la compactabilidad a temperaturas más bajas. Esta metodología podría ser utilizada para evaluar comparativamente la eficiencia de diferentes tipos de aditivos recomendados para este fin.

De los tres aditivos, el A, un surfactante químico, es el que mejor funciona con los dos asfaltos estudiados.

Desde el punto de vista de la compactabilidad de as mezclas, los aditivos parecen funcionar mejor con el asfalto convencional CA 30 que con el modificado AM 3.

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

Marcozzi R., Morea F.

Considerando las implicancias ambientales en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente se han desarrollado tecnologías para reducir las temperaturas de fabricación de manera de generar significativos ahorros de energía, menores emisiones y mayor nivel de seguridad en obra.

Como ha sido demostrado en estudios anteriores las mezclas que utilizan asfaltos modificados con polímeros o asfaltos especiales como ligantes hacen posible la reducción de las temperaturas de fabricación sin afectar significativamente las propiedades mecánicas y de adherencia. Sin embargo, cuando se fabrican mezclas con asfaltos convencionales la reducción de las temperaturas de fabricación implica directamente un importante desmedro de la calidad, aún cuando sea posible obtener las densidades de diseño.

El presente estudio se enfoca en dos aditivos del tipo tensoactivos que fueron incorporados en diferentes tipos de cemento asfáltico para fabricar mezclas tibias, también llamadas semicalientes (WMA).

Los resultados muestran que ante grandes reducciones de las temperaturas de fabricación se presenta una merma en las prestaciones de la mezcla respecto de la mezcla de referencia, asimismo algunos ensayos evidencian más fehacientemente el efecto de la disminución de las temperaturas de fabricación, tales como los ensayos de daño por humedad.

El propósito de la disminución de las temperaturas de fabricación dentro de valores aceptables es generar un significativo ahorro de energía, y esto sin comprometer la vida útil o requerir intervenciones tempranas de mantenimiento que generarían nuevos consumos de energía.

En nuestra investigación trabajamos con sustanciales reducciones de temperatura, de 35 a 55 °C, siguiendo los criterios adoptados para las viscosidades de trabajo; será necesario tratar específicamente cada caso para encontrar un balance entre reducción de temperaturas de fabricación y durabilidad del producto.

Se concluye que, para este fin, los ensayos de daño inducido por humedad son indudablemente métodos muy adecuados para definir rangos aceptables de reducción de

las temperaturas para la fabricación de mezclas tibias o semicalientes.

Introducción

Las temperaturas de fabricación en mezclas asfálticas en caliente son necesaria para un mezclado efectivo y un buen tendido garantizando de esta manera la calidad de la mezcla asfáltica como producto final.

En estudios anteriores (Agnusdei et al, 2004; Marcozzi, 2004) se ha demostrado que es posible reducir las temperaturas de tendido y compactación de las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés) hasta un cierto límite y obtener las mismas propiedades volumétricas. Sin embargo, se comprueba también que al disminuir las temperaturas de mezclado y compactación se reducen las prestaciones mecánicas y de adherencia, siendo este efecto más o menos significativo en función del cemento asfáltico utilizado, el diseño granulométrico y el rango de reducción de las temperaturas (Marcozzi, 2005, 2007).

El objetivo principal de la reducción de las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas en caliente es lograr una disminución de las emisiones de CO₂ y olores, permitiendo además importantes avances en la seguridad laboral en planta y obra.

Esto dio origen a una nueva clasificación de mezclas en función de la energía consumida para su fabricación. Por convención, las mezclas que evaluaremos en el presente trabajo son llamadas mezclas semicalientes o también mezclas tibias (warm mix asphalt WMA, en la bibliografía en inglés).

Conceptualmente son mezclas asfálticas en caliente, ya que utilizan cemento asfáltico como ligante, pero resulta posible producirlas y colocarlas a temperaturas sensiblemente inferiores a las usadas en técnicas convencionales. En nuestra investigación hemos usado dos aditivos tensoactivos de última generación. Estos aditivos no modifican necesariamente la viscosidad y actúan como hiperplastificante en la mezcla sin modificar significativamente las propiedades físico-reológicas del ligante. El surfactante o tensoactivo al reducir la tensión superficial del asfalto produce una reducción de la fuerza

que se opone al mojado de los agregados, además de actuar como agentes lubricantes entre el asfalto y el árido y mejorar las propiedades asociadas a la adherencia y la cohesión.

El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar comparativamente los desempeños de mezclas asfálticas en caliente (HMA) y mezclas semicalientes (WAM) elaboradas con dichos aditivos tensoactivos.

Plan Experimental

Se utilizó para el estudio una mezcla asfáltica de granulometría convencional fina elaborada y compactada a diferentes temperaturas. Los ligantes utilizados fueron del tipo convencional, designado CA 30 y modificado con polímero SBS, designado AM3, con y sin aditivos tensoactivos.

Temperaturas de fabricación

Las HMA fueron elaboradas a temperaturas de mezclado y compactación (T_1) correspondientes a los valores medios de los rangos de viscosidades tradicionales de $0,17 \pm 0,02$ y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s, respectivamente.

Las WMA se elaboraron a temperaturas inferiores a T_1 (T_2 y T_3). T_2 corresponde a las temperaturas de mezclado y compactación propuestas por Khatri et al (2001) basadas en el concepto de Viscosidad a corte cero, con valores medios de 0,75 y 1,40 Pa.s para mezclado y compactación, respectivamente. T_3 corresponde a temperaturas de mezclado y compactación obtenidas extrapolando las curvas en el gráfico Temperatura – Viscosidad para viscosidades de 3 y 6 Pa.s (Tabla 1).

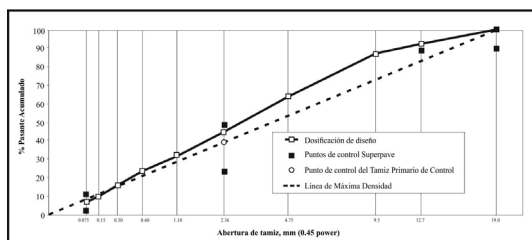
Tabla 1.- Temperaturas de fabricación

ASFALTO	T1 [°C]		T2 [°C]		T3 [°C]	
	0,17 Pa.s	0,28 Pa.s	0,75 Pa.s	1,4 Pa.s	3 Pa.s	6 Pa.s
CA 30	160	150	125	115	105	95
AM3	190	180	157	149	141	134

Tabla 2. Dosificación de la mezcla de diseño

Material	6-19 mm	6-12 mm	0-6 mm	Asfalto
% Aridos	20	15	65	
Dosificación [%]	19	14,2	61,8	5

Tamiz (mm)	19.0	12.7	9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
% Pasante Acumulado	100	92	87	64	45	32	23	16	10	6.2



Materiales y Mezclas

Se estudiaron dos ligantes asfálticos de producción comercial en Argentina, un asfalto convencional CA 30 y el otro un asfalto AM3, modificado con polímero SBS. Estos ligantes fueron mezclados con dos aditivos que se utilizan para reducir las temperaturas de elaboración, uno constituido por ácidos grasos y aminos (A) y otro formado por resinas, polímeros y un activante de adhesividad (B).

Diferentes propiedades mecánicas se determinaron sobre una mezcla asfáltica de granulometría convencional densa, utilizada como patrón. En la tabla 2 se indica la dosificación utilizada y en la figura 1, la correspondiente curva granulométrica. El árido utilizado proviene de una misma fuente. Está formado por fracciones comerciales de árido granítico triturado 6-19mm, 6-12mm y 0-6mm, proveniente de la ciudad de Olavarría, provincia de Buenos Aires.

Ensayos de laboratorio

Los parámetros analizados fueron:

- Estabilidad y fluencia.
- Resistencia a compresión diametral a distintas temperaturas de ensayo.
- Daño por humedad (AASHTO T-283)
- Módulo de rigidez
- Ensayos de rueda cargada en seco y bajo inmersión (ensayo de Hamburgo)

Análisis de resultados

En trabajos realizados anteriormente se ha verificado que las mezclas asfálticas de granulometrías convencionales y no convencionales realizadas con asfaltos modificados con

Figura 1. Curva granulométrica de la mezcla de diseño

polímeros o especiales pueden fabricarse a temperaturas inferiores a las normalizadas con el mismo esfuerzo sin variar significativamente la resistencia que presentan al ser mezcladas y compactadas, presentando, por tanto, propiedades volumétricas similares (Fernández et al, 2003; Agnusdei et al, 2004; Marcozzi, 2004).

En la figura 2 se muestra la compactabilidad de las mezclas asfálticas con CA-30 realizadas mediante compactación Marshall. Se observa que las mezclas con aditivos resultaron más fácilmente compactables que las mezclas sin ellos cuando las temperaturas de fabricación fueron reducidas.

Estabilidad y fluencia Marshall

Para cada tipo de mezcla se moldearon tres probetas. La Tabla 3 y la figura 3 presentan los resultados de los ensayos de estabilidad y fluencia.

Resistencia a tracción indirecta

Para cada tipo de mezcla se moldearon 12 probetas divididas en grupos de 3 para ensayar a cada temperatura. El ensayo de tracción indirecta provee de numerosa información. Por una parte, se conoce que la resistencia a la tracción es dependiente del grado de alteración de la mezcla e implícitamente del asfalto que la compone (Marcozzi, 2002) ya que asfaltos alterados por altas temperaturas de fabricación se rigidizan presentando sus mezclas, en general, valores altos de resistencia a tracción. En este caso mayores resistencias a tracción no estarán

determinando necesariamente una mayor calidad de la mezcla asfáltica.

Por otra parte, la dependencia del comportamiento de una mezcla asfáltica con la temperatura de ensayo se manifiesta además por el tipo de rotura que se presenta en el ensayo. Una rotura tipo dúctil indica un comportamiento tipo sólido viscoelástico, en cuyo caso la resistencia a la tracción se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la cohesión del mástico y la adherencia asfalto – agregado. Una rotura tipo frágil indica un comportamiento tipo sólido elástico y su resistencia se relaciona con la compacidad de la mezcla, con la dureza de los agregados y con la cantidad y calidad del mástico.

Como la gradación, el porcentaje de asfalto, el tipo de agregado y la energía y método de compactación no varían, el tipo de rotura estará determinado por el ligante utilizado (solo o aditivado) y cómo afecta esto a su comportamiento cuando se reducen las temperaturas de fabricación.

En la tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a tracción.

• A 5 °C la mayoría de las mezclas asfálticas se comportaron como sólidos elásticos y el tipo de rotura predominante es por mástico y agregados, del tipo frágil, caracterizada por la presencia de agregados partidos en el plano de rotura de la probeta. No se presentan diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para HMA (T₁) y las mezclas WMA realizadas a temperaturas T₂, con o sin aditivos.

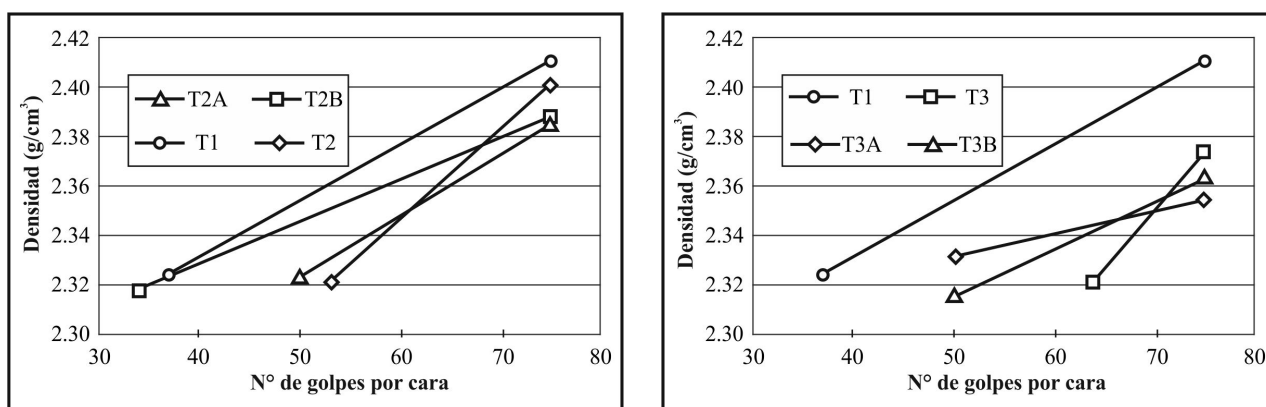


Figura 2. Comparación de la compactabilidad de mezclas en compactación Marshall con CA-30

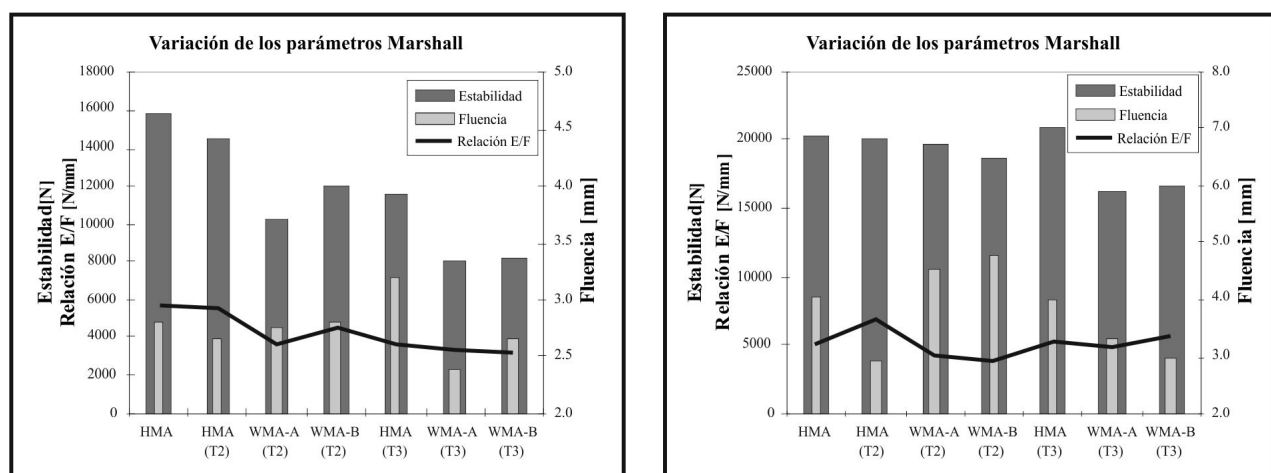


Figura 3. Variación de los parámetros Marshall para mezcla con CA-30 (izq) y AM3 (der).

Tabla 3. Resultados de Estabilidad y Fluencia Marshall para distintas temperaturas de fabricación.

		Mezcla					
		CA-30			AM3		
		HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
Estabilidad Marshall [N]	T ₁	15818	---	---	20339	---	---
	T ₂	14537	10176	11960	19980	19651	18625
	D.S.* con T ₁	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	T ₃	11635	7995	8211	20916	16269	16747
	D.S.* con T ₁	NO	SI	SI	NO	NO	NO
Fluencia [mm]	T ₁	2.8	---	---	4,1	---	---
	T ₂	2.7	2.8	2.8	2,9	4,5	4,8
	T ₃	3.2	2.4	2.7	4,0	3,3	3,0
Relación E/F [N/mm]	T ₁	5651	---	---	5022	---	---
	T ₂	5523	3669	4504	6831	4335	3880
	D.S.* con T ₁	NO	SI	SI	NO	NO	NO
	T ₃	3674	3329	3096	5229	4881	5645
	D.S.* con T ₁	NO	SI	SI	NO	NO	NO

* D.S. con T₁; indica si hay o no diferencias significativas entre los valores medios de los ensayos y el valor del parámetro en mezclas HMA con las temperaturas especificadas, con un 95% de confianza.

• A 15°C las mezclas asfálticas presentan roturas predominantemente por mástic y agregados. La presencia de agregados fracturados en el plano de rotura de la probeta es menor que en el caso de rotura a 5°C. En todos los casos se presentan diferencias significativas en la comparación de los valores medios de las resistencias a compresión diametral para HMA (T₁) y las mezclas WMA realizadas a temperaturas inferiores.

• A 25 °C la mayoría de los asfaltos están cerca del límite inferior del comportamiento elástico. La rotura de las probetas es del tipo de rotura por cohesión (mástic) y/o por adherencia (interfase agregado – asfalto).

• A 35 °C la cohesión y/o adherencia de las mezclas WMA se ven significativamente disminuidas en comparación con la obtenida con la mezcla HMA (T₁).

Aún cuando en algunos casos no existan diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios, en todos los casos se presenta una disminución de los valores de resistencia a tracción cuando se reducen las temperaturas de fabricación, aún con los asfaltos para mezclas semicalientes. Ver Figura 4.

Evaluación de la sensibilidad a la humedad (AASHTO T – 283)

En el ensayo de daño por humedad se moldean probetas según la metodología Marshall, de manera que las mismas tengan un 7 ± 1% de vacíos en su estructura para favorecer el efecto de la acción del agua.

Para cada tipo de mezcla se moldearon nueve probetas y se unieron en grupos de tres de manera que el promedio de densidades de cada grupo sean similares. Uno de estos grupos se destinó a grupo de control.

Las probetas del segundo grupo fueron sometidas a una saturación de sus vacíos con agua y puestas luego en inmersión a 60°C durante 24 hs.

Las probetas del tercer grupo fueron igualmente saturadas, sometidas a un primer ciclo de congelamiento a –18°C durante un periodo de 16 á 18 hs. y luego al ciclo de inmersión en agua a 60°C anteriormente descrito. Luego de cumplimentados los ciclos de cada grupo las probetas fueron ensayadas a compresión diametral a 25°C con el fin de determinar el daño generado por el agua en los distintos ciclos.

Los resultados del ensayo, informados como resistencia conservada (cociente entre la resistencia de las probetas acondicionadas y las de control), se observan en la Tabla 5. Se especifica un valor de 80% como límite inferior para dicho parámetro evaluado según AASHTO T-283.

En el caso de las mezclas semicalientes (WMA) con asfalto CA-30 las resistencias conservadas son mayores que las obtenidas al bajar las temperaturas de fabricación de la mezcla en caliente (HMA), si bien con el aditivo A no cumplen con el valor mínimo especificado.

En las mezclas semicalientes con asfalto AM3 las resistencias conservadas tampoco cumplen con el mínimo especificado al utilizar el aditivo A.

Evaluadas con esta metodología puede definirse el rango de reducción de las temperaturas de fabricación que admite cada mezcla semicaliente para conservan buenas propiedades de cohesión y adherencia

Ensayo de módulo de rigidez

Para cada tipo de mezcla se moldearon tres probetas. Los ensayos se realizaron en la modalidad de carga por

Tabla 4. Ensayo de Resistencia a Tracción mediante compresión diametral.

		MEZCLA					
		CA-30			AM3		
		HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
Resistencia a tracción a 5° [kPa]	T ₁	4061	---	---	4271	---	---
	T ₂	3720	3493	3621	4068	4140	3720
	D.S.* con T ₁	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	T ₃	3288	2908	2903	4161	3780	3797
	D.S. con T ₁	NO	SI	SI	NO	NO	NO
Resistencia a tracción a 15° [kPa]	T ₁	3100	---	---	2908	---	---
	T ₂	2299	2413	2370	2706	2418	2470
	D.S. con T ₁	SI	SI	SI	NO	SI	SI
	T ₃	2236	2020	2107	2661	2232	2351
	D.S. con T ₁	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Resistencia a tracción a 25° [kPa]	T ₁	1545	---	---	1691	---	---
	T ₂	1283	1168	1234	1447	1477	1505
	D.S. con T ₁	SI	SI	SI	NO	NO	NO
	T ₃	1034	883	1072	1402	1068	1185
	D.S. con T ₁	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Resistencia a tracción a 35° [kPa]	T ₁	661	---	---	927	---	---
	T ₂	593	496	499	730	780	694
	D.S. con T ₁	NO	SI	SI	SI	SI	SI
	T ₃	372	367	405	706	574	591
	D.S. con T ₁	SI	SI	SI	SI	SI	SI

* D.S. con T1: indica si hay o no diferencias significativas entre los valores medios de los ensayos y el valor del parámetro en mezclas HMA con las temperaturas especificadas, con un 95% de confianza.

Tabla 5. Relación de valores medios de la Resistencia Retenida según AASHTO T-28

	Resistencia conservada [%]					
	AASHTO T-283 Opcional sin congelamiento			AASHTO T-283		
	ASFALTO CA-30					
	HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
T ₁	87	---	---	88	---	---
T ₂	53	70	86	54	62	84
T ₃	23	57	91	19	58	86
ASFALTO AM3						
T ₁	89	---	---	89	---	---
T ₂	82	82	89	82	76	90
T ₃	69	62	88	69	69	97

compresión diametral descrita en la normativa EN 12697-26, Anexo C. La temperatura de ensayo fue de 20 °C.

Los valores del módulo obtenidos bajo esta configuración de carga se presentan en la tabla 6. En casi todos los casos de mezclas con CA-30 no hay diferencias significativas entre los valores medios (coeficientes de variación entre 0.3 y 9%) al 95% de confianza cuando se comparan con los valores medios de la mezcla HMA (T₁) con CA-30. Para las mezclas WMA (T₃) con AM3 hay diferencias significativas entre los valores medios (coeficientes de variación entre 2.4 y 10%) al 95% de confianza cuando se

comparan con los valores medios de la mezcla con AM3 realizada a T₁, indicando que estas mezclas tibias son significativamente más flexibles.

Aún cuando en algunos casos no existan diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios, en todos los casos se presenta una disminución de los valores del módulo de rigidez cuando se reducen las temperaturas de fabricación. Figura 5.

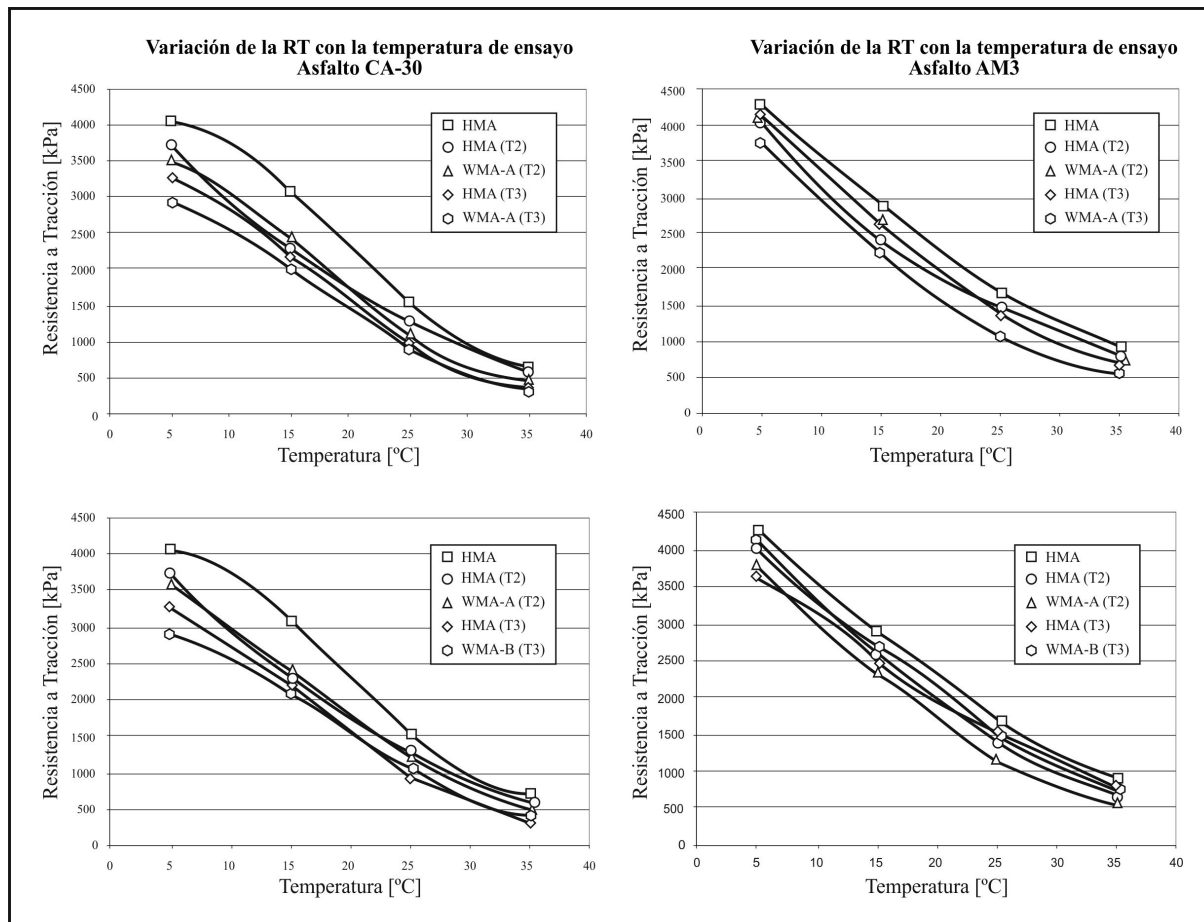


Figura 4. Variación de la Resistencia a Tracción con la temperatura de ensayo. Mezcla con CA-30 (izq) y AM3 (der)

Tabla 6. Módulo de Rigidez (EN 12697-26)

	Módulo de Rigidez [Mpa]					
	CA-30			AM3		
	HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
T ₁	7653	---	---	6302	---	---
T ₂	5757	6573	6289	5483	6064	6565
D.S.* con T ₁	NO	NO	NO	NO	NO	NO
T ₃	5568	5081	5387	5824	4141	4446
D.S. con T ₁	NO	SI	NO	NO	SI	SI

* D.S. con T₁: indica si hay o no diferencias significativas entre los valores medios de los ensayos y el valor del parámetro en mezclas HMA con las temperaturas especificadas, con un 95% de confianza.

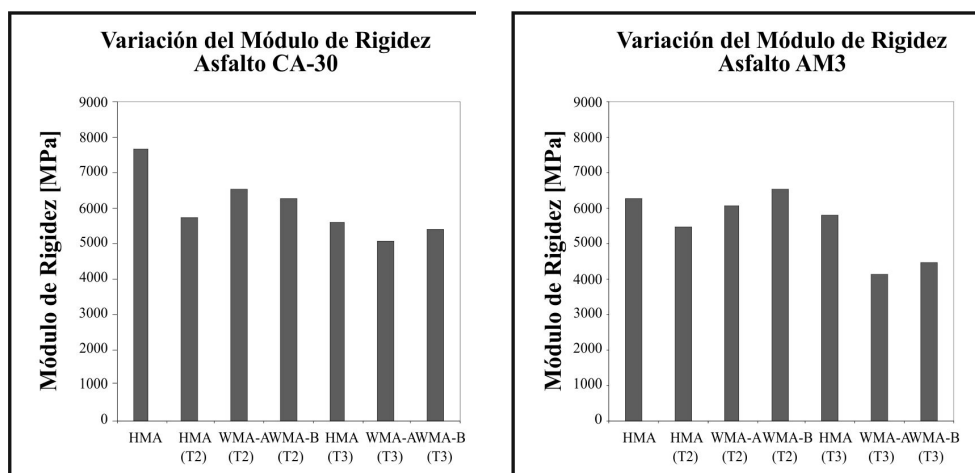


Figura 5. Variación del módulo de rigidez. Mezcla asfáltica con CA-30 (izq) y AM3 (der)

Ensayo de rueda cargada

Se realizaron los correspondientes ensayos de ahuellamiento por rueda cargada según normativa BS 598 y ensayos de adherencia Hamburgo Wheel Tracking Test según AASHTO T-324 por considerarlos herramientas importantes en la verificación de un diseño de mezclas asfálticas.

En nuestro caso, el ensayo de rueda cargada en seco (WTT – Wheel Tracking Test) se extendió 120 minutos. Los parámetros del ensayos están asociados a la zona con velocidad de deformación estable.

El ensayo de rueda cargada bajo inmersión (HWTT – Hamburgo Wheel Tracking Test) se extendió hasta desarrollar deformaciones mayores a 12.5 mm o 10000 ciclos, lo que suceda primero. En el ensayo HWTT la zona secundaria está asociada con la deformación y la zona de flujo terciario está asociada con el inicio de la pérdida de adherencia y cohesión (stripping), si bien puede deberse también a inestabilidad por sobrecompactación.

Ensayo de rueda cargada en seco

Las variables de ensayo fueron: 60°C, 42 pasadas/min durante 120 minutos. Probetas de 300 mm de lado y 50 mm de espesor se compactaron con la densidad de diseño.

Los parámetros medidos en el ensayo son:

- Deformación permanente final (phfinal), en mm, a los 120 min.

Tabla 7. Parámetros medidos al final del ensayo.

		CA-30			AM3		
		HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
Estabilidad Dinámica [pasadas/mm]	T ₁	3723	---	---	17071	---	---
	T ₂	1892	1393	1665	21547	12598	15593
	T ₃	1105	1513	1092	15476	19068	16781
phfinal [mm]	T ₁	4.1	---	---	1.59	---	---
	T ₂	5.8	6.6	5.7	1.08	1.55	1.41
	T ₃	9.1	6.5	8.5	1.35	1.33	1.06

- Estabilidad dinámica (E.D.), en pasadas/mm, es decir, el número de pasadas necesarias para deformar la mezcla asfáltica 1 mm, evaluada entre los 105 y 120 minutos, en los que la pendiente de deformación se considera estable. Dichos valores se presentan en tabla 7.

En las figuras 6 y 7 se comparan los comportamientos bajo rueda cargada de mezclas fabricadas a distintas temperaturas con los asfaltos CA-30 y AM3 con y sin aditivos.

Analizando los resultados se observa que la fabricación de la mezcla asfáltica a temperaturas reducidas sin la incorporación de aditivos presenta menores prestaciones que la mezcla asfáltica HMA (T₁) en el caso del asfalto convencional no así en el asfalto modificado, en el cual no se observan diferencias significativas en el desempeño entre ninguno de los casos estudiados. Los resultados son dependientes del tipo de mezcla; en microaglomerados y SMA realizados con asfaltos modificados, este efecto también es despreciable (Agnusdei et al, 2009).

Ensayo de rueda cargada bajo inmersión

Las características del aparato Hamburgo utilizado y la operatoria general se describen extensamente en el trabajo realizado por Agnusdei y otros, 2005.

Las variables de ensayo fueron: agua a 50°C, 50 pasadas/min durante el tiempo necesario para alcanzar una deformación de 12,5 mm o durante 20000 pasadas (lo que ocurra primero). Las probetas se moldearon con un 7 ± 1

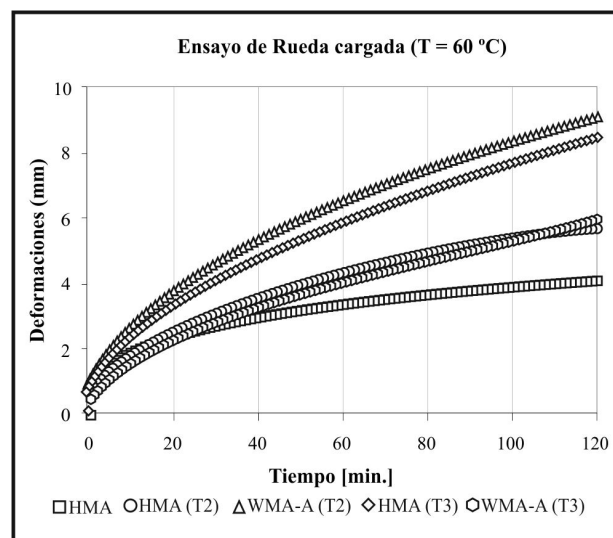
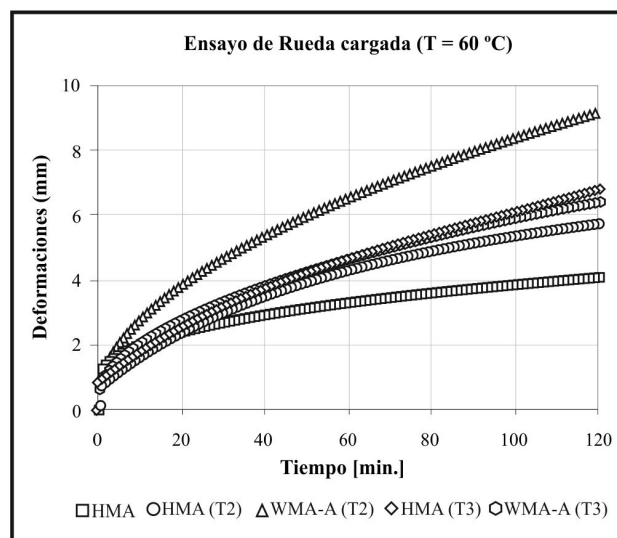
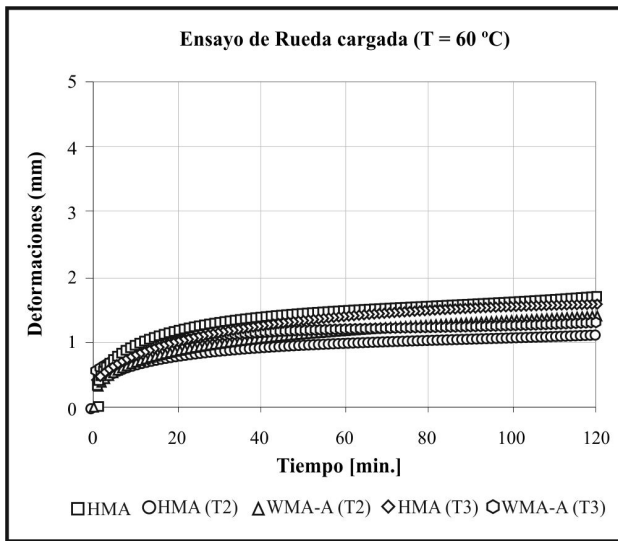


Figura 6. Curvas de ahuellamiento. Asfalto CA-30, solo y con aditivo A (izq), solo y con aditivo B (der)

% de vacíos.

La curva de las deformaciones debidas simultáneamente al paso de una rueda cargada y a la acción del agua a temperatura elevada presenta, en general, tres zonas bien diferenciadas llamas de flujo primario, secundario y terciario. En la bibliografía al respecto la zona secundaria está asociada con la deformación y la zona de flujo terciario en general está asociada al inicio de la pérdida de adherencia y cohesión.

El parámetro analizado fue el punto de intersección de la pendiente de deformación y la pendiente del flujo terciario,



medido a través del número de pasadas de la rueda, tabla 8.

En la figura 8 se presentan las curvas de deformación resultantes del ensayo Hamburgo para las mezclas HMA (temperaturas convencionales y reducidas) y las mezclas WMA (temperaturas reducidas) con el asfalto CA-30. Del análisis de los resultados surge que la mezcla HMA es una mezcla con una regular resistencia al daño por humedad y que su resistencia se ve disminuida de manera notable al ser fabricada a temperaturas reducidas. La incorporación del aditivo B permite que la reducción de casi 40°C en las temperaturas de fabricación no tenga efectos tan

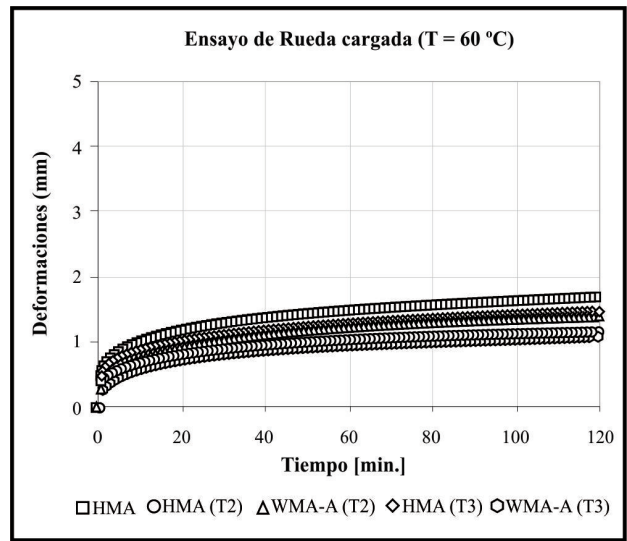


Figura 7. Curvas de ahuellamiento. Asfalto AM3, solo y con aditivo A (izq), solo y con aditivo B (der)

Tabla 8. Ensayo Hamburgo.

	Punto de intersección de las pendientes [pasadas]					
	CA-30			AM3		
	HMA	WMA-A	WMA-B	HMA	WMA-A	WMA-B
T ₁	7400	---	---	Sin Inflexión	---	---
T ₂	4150	3100	6000	6850	Sin Inflexión	Sin Inflexión
T ₃	2400	2400	2600	3600	Sin Inflexión	Sin Inflexión

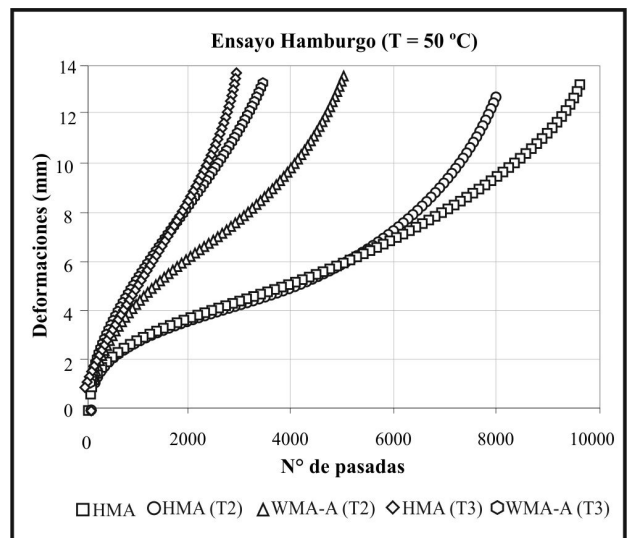
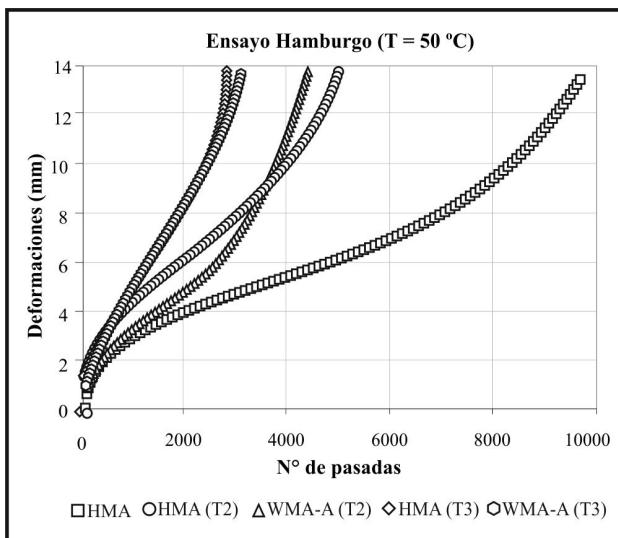


Figura 8. Ensayos de Hamburgo para el asfalto CA 30, solo y con aditivo A (izq), solo y con aditivo B (der)

destruictivos durante el ensayo Hamburgo llegando casi a igualar el comportamiento de la HMA (T_1).

En la figura 9 se presentan las curvas de deformación resultantes del ensayo Hamburgo para las mezclas HMA (temperaturas convencionales y reducidas) y las mezclas WMA (temperaturas reducidas) con el asfalto AM-3. En este caso la reducción de las temperaturas de elaboración produce también una merma en el desempeño de la mezcla. Con la incorporación de los dos aditivos estudiados (A y B) a las mezclas semicalientes se logran resultados de desempeño comparables a la HMA (T_1). En ninguna de estas últimas se observa un punto de inflexión en la curva de deformaciones.

En las mezclas estudiadas se aprecia en algunos casos la pérdida de la película de asfalto y el consecuente desprendimiento de agregados en la huella; en otros casos no se aprecia desprendimiento de agregados, a pesar de haberse desarrollado plenamente la zona de flujo terciario, Figura 10.

Análisis de resultados

Los valores de estabildades y las resistencias a tracción a 5°C no se vieron significativamente afectados cuando se disminuyeron las temperaturas de fabricación de las probetas a T_2 .

Las resistencias a tracción a 15, 25 y 35°C se ven significativamente afectadas cuando se reducen las

temperaturas de fabricación, aún en las mezclas semicalientes WMA.

En las mezclas con el asfalto convencional en estudio la disminución de las temperaturas de fabricación de las probetas destruye la capacidad de la mezcla para resistir el ataque del agua. En el caso de la incorporación del aditivo B, la resistencia al daño por humedad ha conservado valores muy altos, aún con las temperaturas T_3 de fabricación. Si bien en menor medida, la incorporación del aditivo A también evita el brusco descenso de la resistencia al daño por humedad que aparece al fabricar las mezclas a temperaturas tan reducidas.

Los valores de módulo de rigidez no se vieron significativamente afectados en las mezclas con CA-30 cuando se disminuyeron las temperaturas de fabricación en aproximadamente 40 °C. Si bien en todos los casos los valores de módulo se reducen al disminuir las temperaturas de fabricación, las mezclas semicalientes con aditivos presentan mayores valores de módulo de rigidez que las mezclas sin aditivar. En el caso de las mezclas con AM3, hay diferencias significativas cuando se utilizan las temperaturas T_3 .

Ensayo de rueda cargada: El uso de aditivos no tiene efecto sobre la resistencia a las deformaciones permanentes en el ensayo de rueda cargada en seco de las mezclas asfálticas estudiadas.

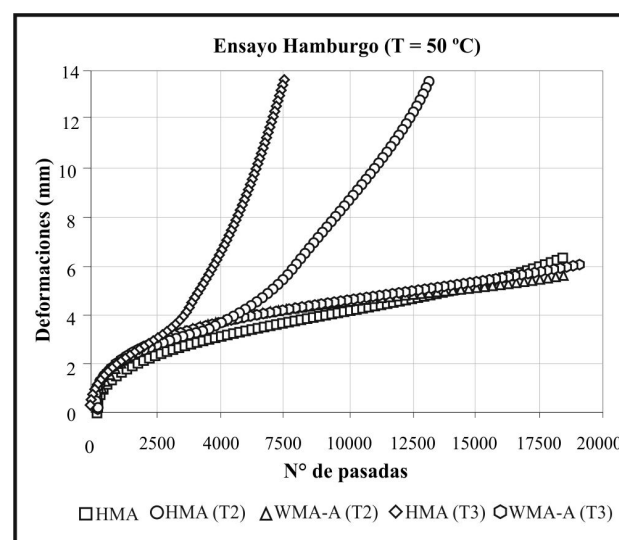
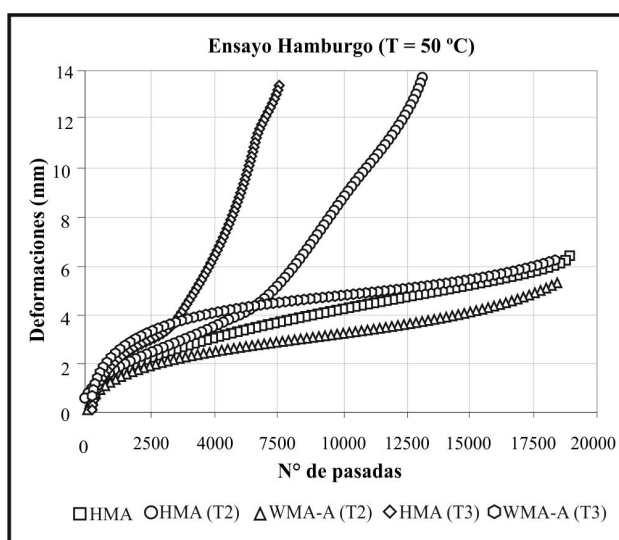


Figura 9. Ensayos de Hamburgo para el asfalto AM3, solo y con aditivo A (izq), solo y con aditivo B (der)

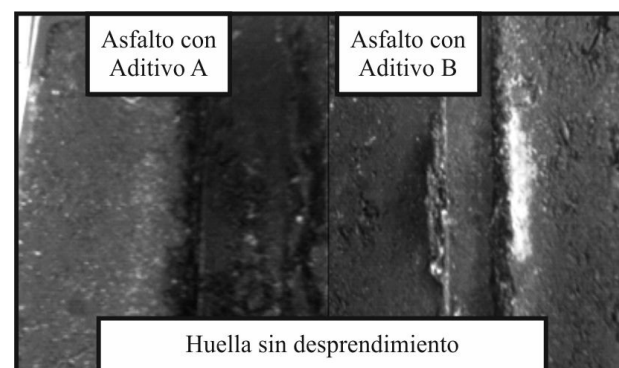
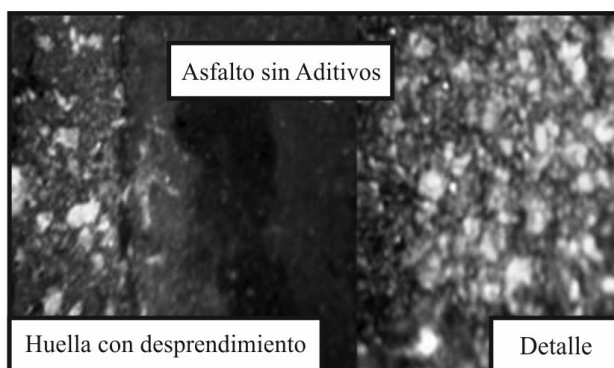


Figura 10. Huella de probetas en ensayo de Hamburgo

En el ensayo Hamburgo la mezcla asfáltica se debilita debido, entre otras causas, al ablandamiento o emulsionando parcial de la película de asfalto, en algunos casos sin removerla de la superficie del agregado (Santucci).

Al incorporar aditivos al asfalto CA-30 se observó que el aditivo A no produce un comportamiento diferente que el que manifiestan la mezclas sin aditar cuando se utilizan temperaturas de fabricación reducidas, mientras que la incorporación del aditivo B en la fabricación de mezclas a T_2 permite que el comportamiento de la mezcla se asemeje al de la mezcla realizada con el asfalto sin aditar a la T_1 . En cuanto al asfalto AM3 se observó que la incorporación de los aditivos para la elaboración de mezclas semicalientes a las temperaturas T_2 y T_3 mejora el comportamiento en el ensayo de rueda cargada bajo inmersión, asemejándose al comportamiento de la mezcla HMA (T_1).

Conclusiones

En todos los casos una reducción de las temperaturas de fabricación provoca una merma en las prestaciones mecánicas de las mezclas. En algunos casos la misma no resulta significativa al plantear el uso de aditivos como en el caso de una reducción del orden de 30°C (T_2).

Los ensayos realizados indican también cambios en las propiedades cohesivas y/o de adherencia de las mezclas asfálticas cuando se trabaja con temperaturas de mezclado y compactación reducidas.

Referencias

- AIREY G. Use of the black diagram to identify inconsistencies in rheological data. Road Materials and Pavement Design. Volumen 3 issue 4 pp: 403-424. 2002.
- AGNUSDEI J.O., JAIR M, IOSCO O.A., FERNÁNDEZ A.I., LÓPEZ, M. Optimización de las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio y en planta de mezclas bituminosas con la utilización de ligantes no convencionales. Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto 2004. Cartagena de Indias, Colombia.
- AGNUSDEI J.O., IOSCO, O.A., MOREA, F. Daños por humedad en mezclas asfálticas. Memorias del XIII° CILA, San José de Costa Rica, Costa Rica. Noviembre del 2005.
- AGNUSDEI, J. MARCOZZI, R. IOSCO, O. JAIR, M. MOREA F. Incidencias de las temperaturas de preparación y compactación sobre las propiedades de las mezclas preparadas con asfaltos modificados. XV Congreso Iberoamericano del Asfalto, 2009.
- FERNÁNDEZ A.I., AGNUSDEI J.O., IOSCO O.A. Temperaturas óptimas de mezclado y compactación de mezclas con asfaltos no convencionales. Memorias del XII° CILA, Quito, Ecuador, Noviembre 2003.
- KHATRI, BAHÍA AND HANSON. Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyrotory Compactor. The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, pp. 368 -401, 2001.
- MARCOZZI, R. Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas realizadas a temperaturas reducidas. Revista Carreteras N° 153 – Mayo/Junio 2007, Asociación Española de Carreteras.
- MARCOZZI, R. Algunos conceptos reológicos sobre mezclas asfálticas compactadas a diferentes temperaturas. Memorias del XIII° CILA, San José de Costa Rica, Costa Rica. Noviembre del 2005.
- MARCOZZI, R. Utilización del Compactador Giratorio Superpave para evaluar la compactabilidad de las mezclas asfálticas. Memorias de la XXXIII° Reunión del Asfalto, Mendoza, Argentina. Noviembre del 2004.
- MARCOZZI, R. Análisis preliminar sobre la utilización del ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas diseñadas mediante el Sistema Superpave. Segunda Parte. Memorias de la XXXII° Reunión del Asfalto, Tafí del Valle, Argentina. Noviembre del 2002.
- NORMA ASTM 6927: Método de ensayo normalizado para la Estabilidad y Fluencia Marshall de Mezclas Bituminosas. Annual Book of ASTM Standards, Volumen 04.03.
- NORMA ASTM 6931: Método de ensayo normalizado para la Resistencia a Tracción Indirecta (IDT) de Mezclas Bituminosas. Annual Book of ASTM Standards, Volumen 04.03.
- NORMA BS 598: Part 110: 1996: Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas: Methods of test for the determination of wheel-tracking rate.
- NORMA AASHTO T-283: Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage..
- NORMA AASHTO T-324: Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).
- NORMA EN 12697-26: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayos para mezclas bituminosas en caliente.

Del análisis de resultados surge que hay ensayos que evidencian más fehacientemente el efecto de la disminución de las temperaturas de fabricación, como el daño por humedad en las dos metodologías utilizadas para su análisis, AASHTO T-283 y AASHTO T-324. Este último, el ensayo Hamburgo, presenta más sensibilidad al daño ocasionado por el agua al sumar el efecto de tránsito. En estos ensayos se destaca el beneficio de la incorporación de aditivos en las mezclas fabricadas a temperaturas reducidas con asfaltos convencionales.

El propósito de la disminución de las temperaturas de fabricación dentro de valores aceptables es generar un significativo ahorro de energía, menores emisiones y mayor nivel de seguridad en obra, pero además debemos asegurar que el pavimento conserve una adecuada vida útil que no requiera mayor mantenimiento ni intervenciones tempranas que generarían nuevos consumos de energía.

En esta oportunidad se ha trabajado con importantes reducciones de temperaturas, del orden de 35 a 55°C , pero será necesario determinar en cada caso soluciones que conduzcan a un compromiso entre la reducción de las temperaturas de fabricación y la durabilidad del producto. Se concluye que, para este fin, las metodologías para evaluar daño por humedad resultan muy adecuadas por lo que se propone su uso como herramienta para definir el rango de reducción de las temperaturas de fabricación que admite cada mezcla semicaliente diseñada para conservar buenas propiedades de cohesión y adherencia.

PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS CON ADITIVOS QUÍMICOS USADOS EN MEZCLAS TIBIAS

Morea F., Marcozzi R.

Las mezclas asfálticas tibias han sido desarrolladas con el objetivo de minimizar las emisiones durante los procesos de producción y tendido de mezclas asfálticas en caliente reduciendo las temperaturas a las cuales las mezclas son fabricadas y compactadas. Sin embargo, esta reducción no debe afectar la trabajabilidad ni la performance final de la mezcla. Los aditivos para mezclas tibias permiten reducir las temperaturas de producción mientras que mantienen la trabajabilidad durante el proceso de mezclado y sin comprometer la performance final del pavimento asfáltico. Hay diferentes aditivos, algunos de los cuales modifican el comportamiento reológico de los asfaltos (ceras o parafinas) mientras que otros, en teoría, no afectan el comportamiento reológico.

En este trabajo, las diferencias entre las propiedades reológicas de asfaltos convencionales y modificados con polímeros, con y sin aditivos químicos, obtenidos de mezclas realizadas en caliente y mezclas tibias fueron estudiados con el Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Adicionalmente, se evaluaron la resistencia al ahuellamiento y la susceptibilidad al agua en dichas mezclas.

Las propiedades reológicas del asfalto modificado con polímeros fueron afectadas por los aditivos para mezclas tibias, mientras que las propiedades reológicas del asfalto convencional no fueron afectadas significativamente. Los aditivos mejoran la trabajabilidad de las mezclas en el proceso de producción. Se observaron mejoras en la performance de los ensayos de ahuellamiento bajo inmersión en agua para mezclas con temperaturas de trabajo reducidas cuando se utilizaron asfaltos aditivados, con resultados similares a los observados en mezclas en caliente.

Introducción

Debido a la importancia de las variables ambientales en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente (HMA), se han desarrollado nuevas tecnologías. Las mezclas tibias aparecen con el objetivo de minimizar emisiones en los procesos de producción y tendido de mezclas para pavimentación mediante la reducción de las temperaturas a las cuales son mezcladas y compactadas. Esto no solo permite minimizar la cantidad de energía requerida, también se reducen las emisiones y olores mejorando el ambiente de los trabajadores.

Otro aspecto importante de las mezclas tibias (WMA) son los beneficios que otorga durante la pavimentación, permitiendo pavimentar en climas fríos, el transporte a mayores distancias, compactar con menores esfuerzos y la posibilidad de abrir al tránsito en corto tiempo.

Tradicionalmente, las temperaturas convencionales utilizadas en la construcción de HMA pretende permitir una buena cobertura de los agregados y facilitar el proceso de extendido de la mezcla. La reducción de las temperaturas de mezclado y compactación pueden traer problemas en las propiedades finales de la mezcla. Por lo tanto es importante considerar esto si lo que se pretende mantener es un buen desempeño. Estudios de investigaciones han reportado reducciones en el desempeño al ahuellamiento y daño por humedad con algunas de las tecnologías de WMA desarrolladas. Su y colaboradores [1] encontraron menores desempeños al ahuellamiento y un incremento en el daño por humedad en WMA elaboradas a partir de la inclusión de ceras sintéticas. Hurley y Prowell [2] encontraron que el potencial de ahuellamiento se incrementó con la reducción de las temperaturas de elaboración y concluyen que las menores temperaturas de mezclado y compactación usadas para producir WMA pueden incrementar el potencial riesgo de daño por humedad.

Las diferentes tecnologías de mezclas tibias buscan mejorar la trabajabilidad y compactabilidad de la mezcla. Esas tecnologías pueden clasificarse en dos grandes grupos, los que utilizan agua y los que incorporan alguna forma de aditivo al asfalto para permitir la reducción de temperaturas [3].

Los procesos que introducen una pequeña cantidad de agua en contacto con el asfalto caliente (vía espumado, materiales como la zeolitas o agregados húmedos) se basan en el hecho que en contacto con el asfalto caliente ese pequeño volumen de agua producirá expansión de la fase asfáltica y una correspondiente disminución de la viscosidad haciendo posible reducir la temperatura de esta manera [3].

Los aditivos orgánicos (ceras tipo Fischer-Tropsch o Montana y las amidas grasas [3]) se incorporan también al asfalto. Las primeras producen una disminución de la viscosidad del asfalto cuando la temperaturas de mezclado y compactación están por sobre la temperatura

de fusión de la cera. Mientras las otras son aditivos que reducen la tensión superficial del asfalto sin modificar sus propiedades reológicas, en teoría.

Diferentes estudios refieren al uso de las zeolitas y ceras en WMA y la relación con sus correspondientes desempeños [5-8]. Sin embargo poca información sobre estudios con aditivos tensoactivos usados en WMA y su efecto en las propiedades reológicas de los ligantes y los desempeños en mezclas son encontrados [9].

En este trabajo se evaluaron las propiedades reológicas de dos asfaltos, uno convencional y uno modificado con polímeros, que se mezclaron con dos tipos de aditivos tensoactivos. Los mismos se extrajeron de mezclas tibias sobre las que se evaluaron su resistencia al ahuellamiento y la susceptibilidad al daño por humedad. Adicionalmente fueron estudiadas las mismas propiedades sobre asfaltos extraídos de mezclas en caliente (HMA) para comparación.

Experimental

Programa de ensayos

El objetivo de este trabajo fue observar los cambios que se producían en las propiedades reológicas de los asfaltos extraídos de las dos tipos de mezclas (HMA, WMA) por efecto de reducir las temperaturas de elaboración. Esas propiedades se analizaron en reómetro de corte dinámico DSR. Al mismo tiempo se evaluaron el desempeño al ahuellamiento y la susceptibilidad al daño por humedad de las diferentes mezclas.

Primero, muestras de HMA y WMA fueron elaboradas a distintas temperaturas para observar los cambios en las propiedades reológicas y en el desempeño de las mezclas producto de la reducción de temperaturas de mezclado y compactación.

Posteriormente, se elaboraron WMA con asfaltos con dos tipos de aditivos tensoactivos. De la misma manera, se evaluaron las propiedades reológicas y los desempeños de las mezclas para su comparación con las mezclas a distintas temperaturas elaboradas sin aditivos.

Las HMA fueron mezcladas y compactadas a las temperaturas convencionales (T_1) de acuerdo al criterio tradicional de valores de viscosidad del asfalto de 0.17 y 0.28 Pa.s.

Las WMA fueron elaboradas a temperaturas (T_2) siguiendo las recomendaciones de Khatri et al. [10] usando el concepto de viscosidad de corte cero con valores de viscosidad del asfalto de 0.75 y 1.4 Pa.s para el mezclado y la compactación respectivamente.

Las muestras de asfalto para los análisis reológicos fueron extraídas directamente de las mezclas después de los ensayos de desempeño de acuerdo a la norma ASTM D 1856 (2003).

Los ensayos reológicos realizados fueron barridos de frecuencia y ensayos de Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). Sobre mezclas se evaluó el desempeño al ahuellamiento en el Wheel Tracking Test (WTT) mientras que la susceptibilidad al daño por humedad fue evaluada

en el ensayo de Hamburgo.

Materiales y mezclas

Asfaltos

En este trabajo se estudiaron dos asfaltos comerciales de Argentina, un convencional (C) y uno modificado con polímero (PM). La Tabla 1 presenta sus principales características incluyendo penetración, punto de ablandamiento, Viscosidad Brookfield a 60 °C y el grado de desempeño (PG) de acuerdo a la norma ASTM D 6373. La Tabla 1 también muestra las temperaturas de mezclado y compactación para los criterios T_1 y T_2 relativo a estos asfaltos.

Aditivos

Se usaron dos aditivos químicos tensoactivos (A y B) para hacer las WMA más trabajables. Los aditivos tensoactivos reducen la tensión superficial del asfalto y disminuyen el ángulo de contacto con el agregado y también actúan como lubricantes mejorando la trabajabilidad de la mezcla.

El aditivo A es un líquido que contiene un agente activo de superficie y fue adicionado al asfalto en un 0,4 % en peso. Mientras que el aditivo B se presenta en pellet y contiene resinas, polímeros y un agente adhesivo que se incorporó al asfalto en un 2 % en peso.

Ambos aditivos se incorporaron al asfalto previamente a la elaboración de las mezclas. Para ello, el asfalto se calentó por dos horas en estufa a una temperatura que asegurara un ablandamiento suficiente del mismo y una viscosidad de 0.3 Pa.s (150 °C y 180 °C para C y PM respectivamente). En estas condiciones, los aditivos fueron incorporados y mezclados con el asfalto por medio de un agitador.

Mezclas

El desempeño de las HMA y WMA se evaluó en una mezcla densamente graduada (D-12), ver Fig. 1. Se utilizaron para su elaboración dos agregados gruesos y una arena de trituración proveniente de la provincia de Buenos Aires.

Tabla 1. Propiedades de los asfaltos

Asfalto	C	PM
Modificación	-	SBS
Clasificación IRAM Argentina	Pen 70/100	AM3-C
Penetración a 25 °C [dmm]	88	64
Punto de ablandamiento (R & B) [°C]	47.6	95.5
Viscosidad Brookfield a 60°C [Pa.s]	150.8	-
Recuperación torsional [%]	-	77.2
PG*	58-22	70-22
Temperaturas de mezclado y compactación		
T_1 (0.17 y 0.28 Pa.s) [°C]	152 - 140	194 - 184
T_2 (0.75 y 1.40 Pa.s) [°C]	120 - 109	157 - 149
ΔT [°C]	32 - 31	37 - 35
* Grado de desempeño (ASTM D 6373 1999)		

La Tabla 2 muestra las granulometrías, pesos específicos y la proporción en mezcla de cada tipo de agregado.

Originalmente la HMA fue diseñada a través del método Marshall encontrándose un porcentaje de asfalto óptimo del 5% para ambos tipos de asfalto (C y PM). La Tabla 3 presenta el resto de las principales características determinadas para el diseño incluyendo densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad y fluencia. De la misma manera, las WMAs fueron hechas de acuerdo al diseño en lo que respecta al contenido óptimo de asfalto, La Tabla 3 muestra también las principales características de estas mezclas.

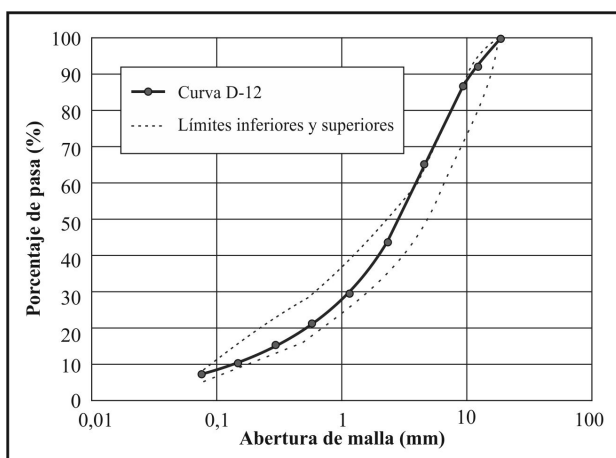


Figura 1: Gradación de la mezcla.

Tabla 2. Propiedades de los agregados.

Tamaño tamiz [mm]	Agregados gruesos		Arena de trituración
	6-20 mm	6-12 mm	0-6 mm
Pasa [%]			
25,40	100	100	100
19,00	99,1	100	100
12,50	60,4	99,8	100
9,50	37,5	98,5	100
4,75	6,0	8,5	94,8
2,36	2,8	3,1	65,4
1,18	2,2	2,2	45,7
0,60	1,9	1,7	32,8
0,30	1,5	1,3	23,4
0,15	1,1	0,9	15,9
0,0075	0,8	0,3	11,1
Gs [gr/cm ³]	2,727	2,724	2,521
% en mezcla	20	15	65

Tabla 3. Propiedades de las mezclas.

Mezcla Asfalto	HMA C	WMA C	WMA C+A	WMA C+B	HMA PM	WMA PM	WMA PM+A	WMA PM+B
Contenido de asfalto [%]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Densidad [gr/cm ³]	2,349	2,348	2,314	2,335	2,351	2,345	2,370	2,353
Vacíos [%]	6,6	6,6	7,7	6,8	6,5	6,7	5,1	5,9
Estabilidad [kN]	15,8	14,5	10,2	12,0	20,3	20,0	19,7	18,6
Fluencia [mm]	2,8	2,7	2,8	2,8	4,1	2,9	4,5	4,8

Procedimientos de ensayo

Ensayos reológicos

Un reómetro de corte dinámico (DSR) de Paar Physica con un Rheolab MC 100 fue utilizado para evaluar la respuesta reológica de los asfaltos. El equipo tiene un termo estabilizador que permite setear la temperatura en un rango de 0 a 90 °C a través de un sistema de circulación de agua que rodea la muestra de asfalto. Los ensayos seleccionados para caracterizar el comportamiento reológico fueron el barrido de frecuencias y el Multiple Stress Creep Recovery (MSCR).

El barrido de frecuencias fue hecho en el rango de 1 a 10 Hz para las temperaturas que van de 10 a 80 °C para pasos de 10 °C. Se usó la configuración de platos paralelos de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor de la muestra. Los barridos de frecuencias fueron realizados dentro de la región lineal viscoelástica de los asfaltos estudiados.

El MSCR se basa en el ensayo de Repeated Creep Recovery [11]. En este ensayo el DSR fue usado para aplicar una tensión constante sobre la muestra de asfalto durante 2 s, luego la carga es removida y se permite la relajación de la muestra durante 18 s. Este ciclo fue aplicado siete veces para una tensión de 0.1 kPa y luego otros siete ciclos (2 s de carga y 18 s de recuperación) fueron aplicados con una tensión de 3.2 kPa. Esta metodología de ensayo es similar a la de la norma ASTM D 7405 (2010) con la única diferencia de la norma especifica 20 ciclos en total de 1 s de carga y 9 s de relajación. Esta configuración no pudo ser aplicada debido a limitaciones del DSR. Este ensayo fue llevado a cabo a una temperatura de 60 °C, temperatura del ensayo de Wheel Tracking y cercana a la del ensayo de Hamburgo.

Durante el ensayo de MSCR las deformaciones que ocurren al asfalto son monitoreadas para los catorce ciclos. A partir de los datos se calcularon los valores medios de los porcentajes de deformación recuperada (% ϵ_r) para los siete ciclos a cada nivel de tensión y el Creep Compliance no recuperable (J_{nr}) al final del ensayo como se indica en las Eq. 1, 2 y 3.

Donde % ϵ_r es la media de los porcentajes de deformación recuperada a la tensión especificada, ϵ_{2s} es el valor de la deformación al final de la etapa de creep después de 2 s de carga en el ciclo i y ϵ_{20s} es el valor de la deformación al final de la etapa de relajación a los 20 s en el ciclo i .

El MSCR es un ensayo de asfaltos relacionado con el comportamiento al ahuellamiento en mezclas creado como complemento de la clasificación por grados de desempeño de la norma ASTM D 6373 para los asfaltos

modificados. Este ensayo fue diseñado para evaluar la respuesta elastomérica de los asfaltos modificados. El porcentaje de recuperación (ϵ_r) puede usarse para detectar la habilidad del asfalto modificado para mantener una respuesta elástica a diferentes niveles de tensión. Una caída de 15 % en ϵ_r de los 0.1 a los 3.2 kPa ($\Delta\epsilon_r$), como se indica en la Eq 4, es considerado un límite para determinar si el asfalto tiene una respuesta elastomérica sostenible.

El Jnr es una medida de las deformaciones permanentes al final del ensayo. Cuanto más grande el Jnr más débil es la resistencia a las deformaciones inducidas por cargas y descargas bajo diferentes niveles de tensión. Un alto valor de Jnr supone una pobre resistencia al ahuellamiento. Los requerimientos de Jnr especificados para un asfalto es de 4.0 kPa⁻¹ para tránsito de vehículos rápidos, mientras que para tránsito de vehículos de velocidad media a lenta los requerimientos son de 2.0 o 1.0 kPa⁻¹, correspondiente a un material más resistente al ahuellamiento [12].

El MSCR no se considera para los asfaltos convencionales. Sin embargo se midió aquí debido a que se presenta como un buen parámetro para comparar el comportamiento de los diferentes casos estudiados (por reducción de temperatura, con o sin aditivos). El porcentaje de recuperación no fue medido para este tipo de asfaltos.

$$\% \epsilon_r (0.1 kPa) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{i=1}^7 \frac{(\epsilon_{2s} - \epsilon_{20s})}{\epsilon_{2s}} \cdot 100 \quad \text{Eq 1}$$

$$\% \epsilon_r (3.2 kPa) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{i=8}^{14} \frac{(\epsilon_{2s} - \epsilon_{20s})}{\epsilon_{2s}} \cdot 100 \quad \text{Eq 2}$$

$$Jnr = \frac{\text{Deformación acumulada}}{3.2} \left[\frac{1}{kPa} \right] \quad \text{Eq 3}$$

$$\Delta\epsilon_r = \epsilon_r (3.2 kPa) - \epsilon_r (0.1 kPa) \quad \text{Eq 4}$$

Ensayos de desempeño

El desempeño de las mezclas asfálticas se evaluó con respecto a su Resistencia al ahuellamiento y susceptibilidad al daño por humedad. El ensayo de Wheel Tracking (WTT) [13] fue utilizado para caracterizar la resistencia al ahuellamiento en condiciones controladas de laboratorio. El equipo consiste en una rueda de goma maciza, 207 mm de diámetro y 47 mm de ancho, cargada con 520 ± 5 N. La rueda cargada describe un ciclo armónico simple en una distancia de viaje de 230 mm con una frecuencia de 21 ciclos por minuto sobre la probeta de mezcla asfáltica. Las probetas de ensayo fueron compactadas a la densidad de diseño. La profundidad de ahuellamiento fue medida a lo largo del ensayo cada 1 min a través de un LVDT durante 120 min. La temperatura de ensayo fue de 60 °C.

El ensayo de Hamburgo (AASHTO T 324) fue utilizado para caracterizar la resistencia al ahuellamiento bajo la acción del agua y tránsito. El equipo consiste en una rueda de acero solida, 203.6 mm de diámetro y 47 mm de ancho, cargada con una carga de 705 ± 4.5 N. La rueda cargada describe un ciclo armónico simple sobre la probeta de

mezcla asfáltica que tiene un 7 ± 1 % de porcentaje de vacíos. La rueda circula hacia adelante y hacia atrás con una frecuencia de 25 ciclos por minuto durante 20000 pasadas, si la máxima deformación permitida de 12,5mm no se alcanza. La temperatura de ensayo fue de 50 °C. La profundidad de huella fue medida a lo largo del ensayo cada 1 min a través de un LVDT y la profundidad de huella versus el número de pasadas fue graficado. La curva puede ser dividida en tres partes. Siempre hay una pendiente de ahuellamiento (debido a la carga) seguida de una pendiente de desprendimiento si la mezcla tiene un daño por humedad. Entre las dos pendientes aparece el punto de quiebre el cual se asocia con la susceptibilidad al daño por humedad y se relaciona con una falla en la adherencia en la interface entre los áridos y el ligante.

Resultados y discusión

En este trabajo fueron estudiadas las propiedades reológicas de asfaltos convencionales y modificados con polímeros, con y sin la incorporación de aditivos tensoactivos (extraídos de HMA y WMA). Adicionalmente se evaluó la resistencia al ahuellamiento (por medio del WTT) y la susceptibilidad al daño por humedad (por medio del ensayo de Hamburgo) de las mezclas. Es importante destacar que las WMAs fueron elaboradas a temperaturas obtenidas siguiendo las recomendaciones de Katri et al [10]. De esta manera la reducción de temperaturas estuvo entre los 30 y 35-40 °C para los asfaltos C y PM respectivamente (ver Tabla 1). Las secciones siguientes describen los resultados encontrados.

Propiedades reológicas de los asfaltos sin aditivos de las mezclas evaluadas

En primera instancia, se analizó la respuesta reológica de los asfaltos sin aditivos extraídos de las HMAs y WMAs. La Fig. 2 muestra los valores de módulo complejo ($|G^*|$, G^* en adelante) y del ángulo de fase (δ) en función de la frecuencia para los asfaltos C y PM. Los resultados se volcaron en curvas maestras para la temperatura de referencia de 60 °C. El comportamiento reológico del asfalto C no muestra ningún cambio significativo producto de la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación. Temperaturas desde T_1 (152-140 °C) a T_2 (120-109 °C). Sin embargo, se observaron valores más bajos de G^* para todo el rango de frecuencias en el caso del PM(T_2) en comparación con el PM(T_1). De forma similar PM(T_2) tiene valores más altos de δ que PM (T_1) para frecuencias altas de medición, por lo tanto el primero tiene una respuesta más viscosa. Como se esperaba, la reducción de temperaturas produce un menor envejecimiento de este asfalto. Es importante destacar que para PM, las condiciones T_1 y T_2 corresponde a temperaturas de 184-194 °C y 149-157 °C, respectivamente.

La Fig. 3 muestra los resultados de los ensayos de MSCR a 60 °C para los asfaltos solos C y PM para las condiciones de temperaturas T_1 y T_2 . Los asfaltos de WMAs (condición T_2) muestran mayores deformaciones acumuladas que los asfaltos de las HMA (condición T_1) para ambos tipos de ligante. Sin embargo, este hecho fue más pronunciado en el asfalto modificado con polímero (PM). Este hecho se puede relacionar al menor envejecimiento del asfalto y con un incremento en el riesgo de ahuellamiento en mezclas.

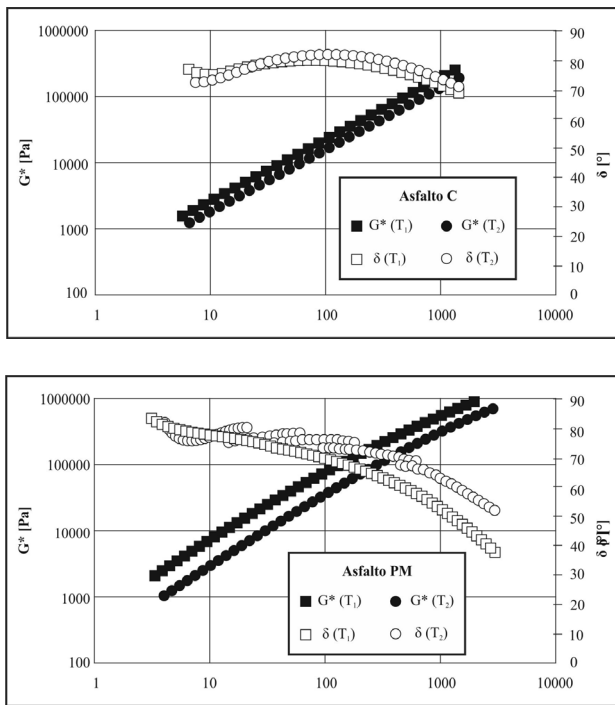


Figura 2: Curvas maestras a T_1 y T_2 ($T_{ref} = 60\text{ °C}$); C (arriba); PM (abajo)

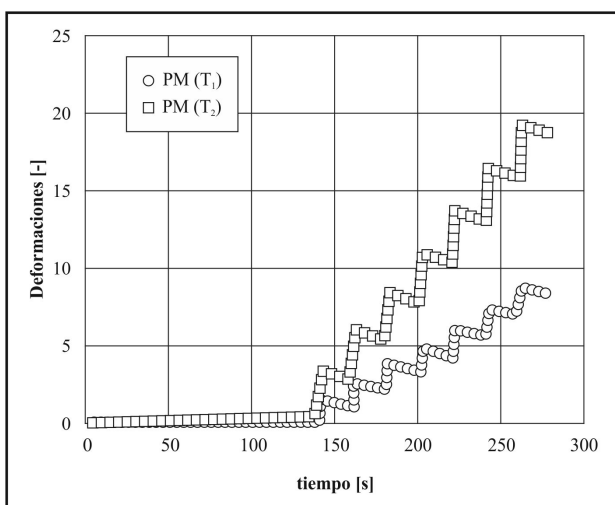
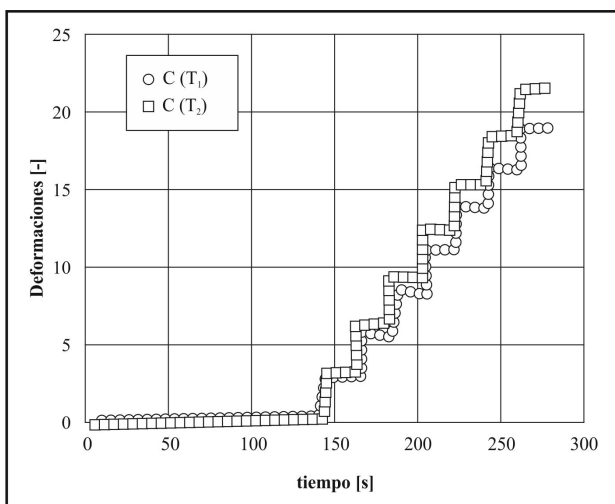


Figura 3: Ensayos de MSCR a T_1 y T_2 ($T_{ensayo} = 60\text{ °C}$); C (arriba); PM (abajo)

La Tabla 4 muestra los parámetros obtenidos en los ensayos de MSCR de los diferentes asfaltos, ϵ_r (para 0.1 y 3.2 kPa), J_{nr} y $\Delta\epsilon_r$. Se observa que los valores de J_{nr} para PM (T_1) son la mitad que para PM (T_2). Por lo tanto el asfalto PM (T_2) es más susceptible al ahuellamiento que PM (T_1) como fuera mencionado anteriormente. Por su parte, los valores de ϵ_r para PM (T_1) y PM (T_2) muestran una pobre respuesta elástica y se observa un decrecimiento mayor al 15 % en ϵ_r con el cambio en el nivel de tensión, peor en el caso de PM (T_2).

En el caso del asfalto C los valores de J_{nr} para ambos casos fueron similares y altos. Considerando estos resultados, mezclas preparadas con este asfalto en particular son susceptibles de sufrir ahuellamientos con temperaturas de más de 60 °C.

Considerando los resultados reológicos, la reducción de temperaturas no produce cambios significativos en el comportamiento del asfalto C. Sin embargo, los resultados del asfalto PM reflejan que estas menores temperaturas de elaboración incrementan el riesgo de ahuellamiento de la mezcla, debido básicamente a un menor envejecimiento del asfalto que debe ser tenido en cuenta.

Tabla 4. Resultados de ensayos de MSCR para los asfaltos sin aditivos extraídos de HMAs y WMAs.

Parámetros del MSCR	Límites	C(T_1)	C(T_2)	PM(T_1)	PM(T_2)
% ϵ_r (0.1 kPa)	---	---	---	100	97.7
% ϵ_r (3.2 kPa)	---	---	---	22.9	14.8
J_{nr} [1/kPa]	< 4	60.4	68.2	2.6	5.8
$\Delta\epsilon_r$ [%]	< 15			77.1	82.9

Ensayos tradicionales sobre los asfaltos

Previo a los ensayos reológicos se realizaron ensayos de penetración y viscosidad de los diferentes asfaltos extraídos de las WMAs (con y sin aditivos). Como se observa en la Tabla 5 los aditivos para WMA (A o B) no tienen un impacto en los valores de penetración o viscosidad del asfalto C. Mientras que en el caso de los asfaltos PM con aditivos se observa un ligero incremento en los valores de penetración y viscosidad. En general no se observan diferencias significativas entre los asfaltos solos y aquellos con la incorporación de los aditivos en estos ensayos.

En lo que se refiere a la temperatura de alta (Talta) del grado de desempeño PG de los ligantes de la norma ASTM D 6373, no se observan cambios significativos en el asfalto C. Valores de Talta de 59.0, 59.5 y 59.5 °C fueron obtenidos para los asfaltos C, C+A y C+B. En el caso del asfalto PM, los aditivos incrementan ligeramente la Talta. Se obtuvieron valores de Talta de 74.5, 79.0 and 75.8 °C para PM, PM+A y PM+B, respectivamente. Se observa que para PM el aditivo A produce un cambio en el grado de PG de 70 a 76, sin embargo la máxima temperatura fue solo incrementada en 4.5 °C luego de incorporar el aditivo.

Tabla 5. Propiedades reológicas tradicionales de los asfaltos extraídos de WMAs

	C	C+A	C+B	PM	PM+A	PM+B
Penetración a 25 °C [dmm]	54	52	51	30	44	41
Viscosidad [Pa.s]						
135 °C	0.45	0.44	0.40	2.07	4.03	4.55
150 °C	0.22	0.22	0.20	0.89	1.43	1.43
170 °C	0.10	0.10	0.09	0.34	0.46	0.44
190 °C	---	---	---	0.16	0.20	0.19

Propiedades reológicas de los asfaltos con y sin aditivos usados en WMA

El principal objetivo de este trabajo fue observar si los aditivos químicos tensoactivos incorporados al asfalto para la producción de mezclas tibias causaban algún efecto en las propiedades reológicas de los mismos. Para ello se realizaron ensayos de barridos de frecuencia y MSCR sobre los asfaltos con aditivos extraídos de las WMAs. La Fig. 4 muestra las mediciones obtenidas en el DSR de G^* y δ en función de la frecuencia en forma de curvas maestras para la temperatura de referencia de 60 °C. La Fig.4 muestra también los resultados obtenidos sobre los asfaltos sin aditivos C (T_2) y PM (T_2) como control. Se puede observar allí como la incorporación del aditivo no cambia el comportamiento reológico del asfalto C. Sin embargo, se observa un comportamiento diferente para PM con aditivo (PM + A y PM + B) comparado con el asfalto solo. Mientras que los valores de G^* cambian relativamente poco los valores de δ decrecen notablemente para las bajas frecuencias. Esto se traduce en un comportamiento más elástico como puede observarse en el diagrama Cole-Cole de la Fig. 5. Allí se observa que PM + A and PM

+ B tienen mayores módulos de almacenamiento a bajas frecuencias (o altas temperaturas) que el asfalto PM solo. Por lo tanto, el asfalto PM con aditivos puede ofrecer una mejor respuesta al ahuellamiento. La Fig. 6 muestra los diagramas de Black [14] de los asfaltos PM donde puede observarse los diferentes comportamientos.

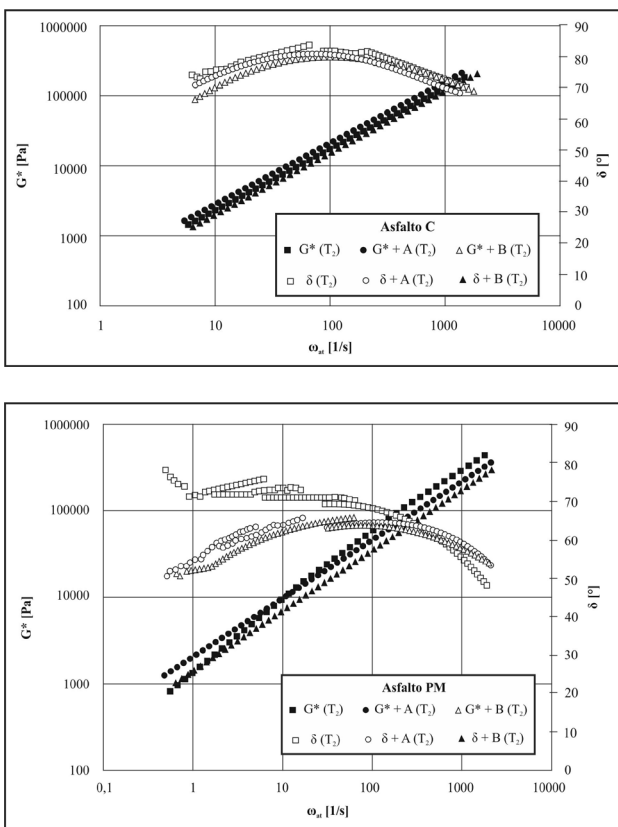


Fig. 4. Curvas maestras a T_2 (Tref = 60 °C); C, C+A y C+B (arriba); PM, PM+A y PM+B (abajo)

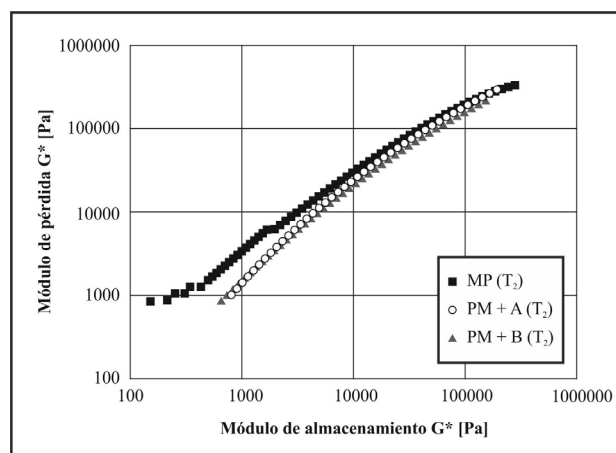


Figura 5: Diagrama Cole-Cole para PM, PM+A and PM+B a T_2

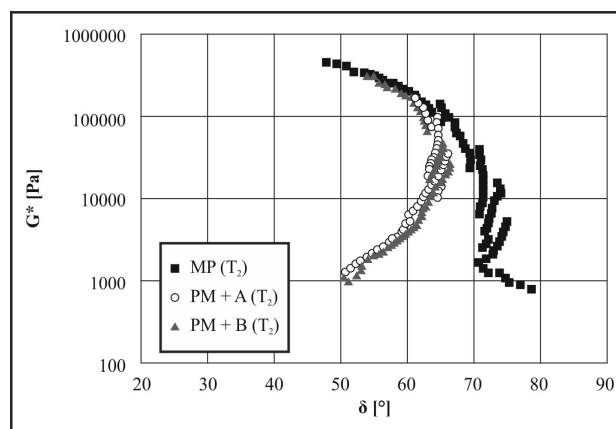


Figura 6: Diagrama de Black para PM, PM+A and PM+B a T_2

La Fig. 7 muestra los ensayos de MSCR a 60 °C de C y PM con aditivos y también los resultados obtenidos para los asfaltos solos en la condición T_2 como control. De la misma forma que se observó en los ensayos de barridos de frecuencia, los ensayos de MSCR muestran que la adición de los aditivos para WMA al asfalto C no cambia significativamente su comportamiento reológico. Sin embargo los asfaltos PM con aditivos (PM+A o PM+B) muestran cambios drásticos en su comportamiento en comparación al asfalto solo, PM (T_2). En primer lugar

se observa un decrecimiento de las deformaciones acumuladas al final del ensayo en los asfaltos con aditivos en comparación al asfalto solo (ver Tabla 6). Por su parte los valores de J_{nr} son comparables a los que se obtuvieron para el asfalto solo extraído de la HMA, PM (T_1), como se muestra en la Tabla 4. Adicionalmente se observa una mejora significativa en la recuperación elástica con valores de $\Delta\epsilon_r$ ($\epsilon_r 3.2 \text{ kPa} - \epsilon_r 0.1 \text{ kPa}$) cercanos a los especificados de 15 % para el caso de PM+A. A pesar de que PM + B no alcanza a satisfacer las especificaciones ($\Delta\epsilon_r = 32.9 \%$) se observa una clara mejora en la respuesta elástica comparándola con la del asfalto PM solo ($\Delta\epsilon_r = 82.9 \%$). En consecuencia la incorporación de los aditivos mejora la respuesta elastomérica de los asfaltos PM que se traduce en una mejor respuesta frente al ahuellamiento.

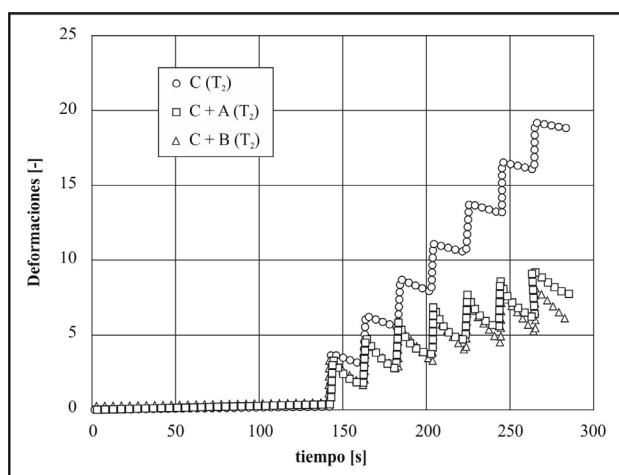
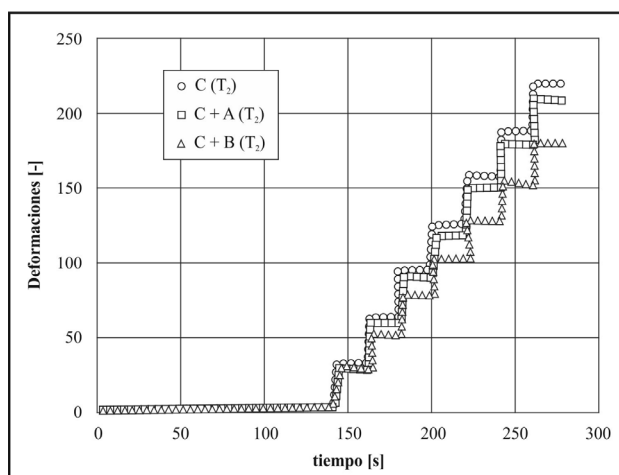


Fig. 7. Ensayos de MSCR a T_2 ($T_{\text{ensayo}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$); C, C+A y C+B (arriba); PM, PM+A y PM+B (abajo)

Ensayos de desempeño

El desempeño al ahuellamiento y la susceptibilidad al daño por humedad de las HMAs y WMAs fueron estudiados por medio de los ensayos de Wheel Tracking y Hamburgo. Los mismos se eligieron ya que típicamente las WMAs fallan en estos ensayos de acuerdo a lo reportado en varias investigaciones [1, 2].

La Fig. 8 muestra las medidas de deformaciones permanentes de las mezclas estudiadas en el ensayo de Wheel Tracking. Como la temperatura de elaboración fue reducida de (T_1 a T_2) el desempeño empeora en las mezclas con asfalto C (Fig. 8 arriba) La incorporación de

los aditivos (A o B) mejoró el desempeño al ahuellamiento de las WMAs.

Los ensayos de Wheel Tracking sobre las mezclas con asfaltos PM (PM, PM+A o PM+B) no muestran diferencias significativas entre ellos, incluso con la reducción de temperatura y sin de aditivos el asfalto (ver Fig. 8 abajo). Una posible explicación puede encontrarse en la tensión de corte aplicada durante el ensayo. La tensión de corte aplicada puede ser insuficiente para desarrollar cambios en el comportamiento de las diferentes mezclas elaboradas con PM, PM+A y PM+B a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. D'Angelo et al. [15] dice que si la tensión de corte aplicada es demasiado baja no producirá suficiente tensión en el asfalto modificado como para que la cadena de polímero se deforme y por tanto cualquier diferencia en el comportamiento no puede observarse. Si se aplicara una mayor tensión durante un periodo de tiempo más prolongado, como por ejemplo en el ensayo de Wheel Tracking con la norma UNE 12697-22 [16], podrían observarse diferencias en el comportamiento como pudo hacer con los ensayos reológicos.

La Fig. 9 muestra las deformaciones permanentes medidas en los ensayos de Hamburgo. Se pudieron observar cambios en el desempeño de las mezclas cuando se disminuyó la temperatura de elaboración y con la incorporación de aditivos. En primer lugar la reducción de las temperaturas de elaboración produjo una merma importante en el desempeño de las WMAs elaboradas con los dos asfaltos solos, C(T_2) y PM(T_2), en comparación a sus respectivas

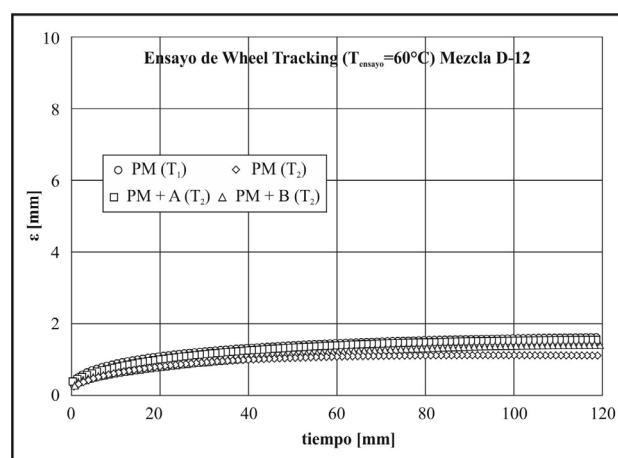
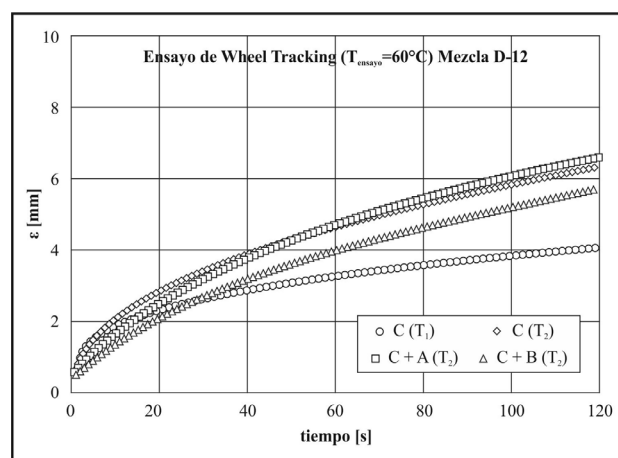


Fig. 8. Deformaciones permanentes versus tiempo en el ensayo de Wheel Tracking; con asfaltos C (arriba) con asfaltos PM (abajo)

HMA. Los resultados muestran que la HMA hecha con el asfalto C es una mezcla con una pobre resistencia al daño por humedad y que se disminuye significativamente cuando se elabora a menores temperaturas. En el caso de PM es aún peor, observándose un daño por humedad (pendiente de desprendimiento) cuando la mezcla es elaborada a menores temperaturas (WMA sin aditivos) la cual no se observó en la HMA.

La inclusión de los aditivos (A y B) mejora el desempeño de las WMAs elaboradas con PM (ver Fig. 9 abajo), obteniéndose desempeños similares a los obtenidos para HMA (condición T₁). En las WMAs hechas con C, la adición del aditivo químico tensoactivo B mejoró el desempeño de la mezcla resultando este similar al desempeño de la HMA con C. En contrapartida, el aditivo A no produjo ninguna mejora en el desempeño de la WMA.

Los ensayos de Hamburgo muestran resultados análogos a los observados en los ensayos reológicos, especialmente a los observados en el ensayo de MSCR. Este ensayo de desempeño se muestra como una herramienta eficiente para poner de manifiesto el efecto que produce la reducción de las temperaturas de elaboración en la mezcla y también observar el efecto positivo de los aditivos para WMAs.

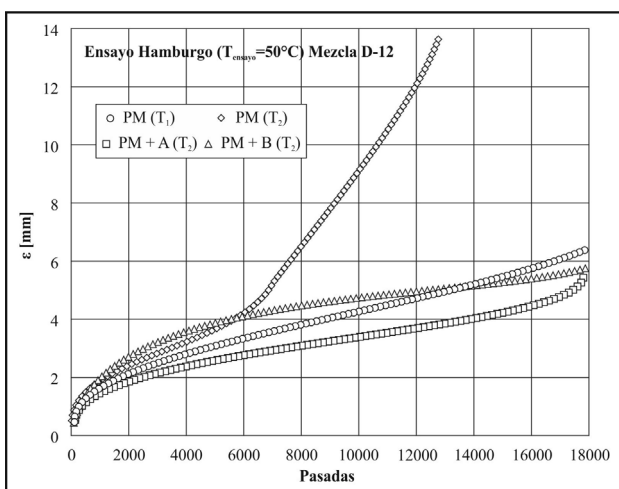
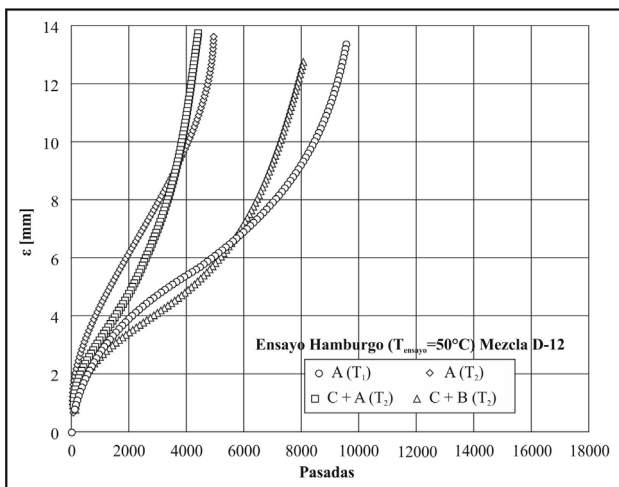


Fig. 9. Deformaciones permanentes versus tiempo en el ensayo de Hamburgo; con asfaltos C (arriba), con asfaltos PM (abajo)

Conclusiones

Las propiedades reológicas de un asfalto convencional (C) y uno modificado con polímero (PM), con y sin aditivos, fueron estudiados después de extraer muestras desde varias mezclas en caliente (HMAs) y mezclas tibias (WMAs). Adicionalmente, se evaluó la resistencia al ahuellamiento en el ensayo de Wheel Tracking y la susceptibilidad al daño por humedad en el ensayo de Hamburgo de las mezclas. Las principales conclusiones se indican a continuación.

Las propiedades reológicas del asfalto C no muestran cambios significativos, ni por efecto de reducir las temperaturas de mezclado y compactación o producto de los aditivos para elaborar WMA en ninguno de los ensayos reológicos realizados.

El comportamiento reológico observado en el asfalto PM sin aditivos reveló un peor comportamiento del mismo cuando las temperaturas de elaboración eran menores. Este resultado pudo verse especialmente en el ensayo de Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) e implica un incremento en el riesgo de ahuellamiento en la mezcla. Esto se debe básicamente a un menor envejecimiento del ligante que debe ser tenido en cuenta.

Los asfaltos C y PM sin aditivos, extraídos de WMAs, presentan mayores deformaciones acumuladas en el ensayo de MSCR que los correspondientes a las HMAs. Los primeros se presentan como asfaltos con predisposición a sufrir ahuellamientos. Además en el asfalto PM sin aditivos la respuesta elástica se ve debilitada producto de las menores temperaturas de elaboración.

La incorporación de aditivos en las WMAs mejora el comportamiento reológico del asfalto PM en comparación al de control (el de WMA sin aditivo). La respuesta elástica de PM con aditivo es mejorada, se observó una reducción importante de las deformaciones acumuladas en el ensayo de MSCR, similar al resultado del asfalto PM extraído de la HMA.

Los ensayos de Wheel Tracking para las mezclas con asfalto C revelan un peor comportamiento de la mezcla con la reducción de las temperaturas de elaboración. Además, la incorporación de aditivos al asfalto no mejoró el comportamiento al ahuellamiento de las WMAs.

En contraste con las mejoras reológicas observadas en el asfalto PM con aditivos, los ensayos de desempeño al ahuellamiento con los asfaltos PM no muestran cambios significativos a lo largo de los diferentes casos de estudio, ni producto de la reducción de temperaturas o por la adición de aditivos al asfalto. Una posible explicación puede encontrarse en la carga aplicada durante el ensayo. Esta carga puede que no produzca una tensión de corte suficientemente importante de manera que produzca que la cadena de polímero del asfalto modificado se deforme, la cual es necesaria en orden de observar alguna diferencia.

Se observó una importante disminución del desempeño en el ensayo de Hamburgo de las mezclas elaboradas con los dos tipos de asfalto sin aditivos cuando las temperaturas de elaboración fueron reducidas. Mejoras del desempeño pudieron observarse en las WMAs con asfalto PM con la incorporación de los aditivos (A y B). Mientras que en el

caso del asfalto C solo el aditivo B produjo una mejora del comportamiento de la WMA.

El ensayo de Hamburgo aparece como una herramienta efectiva para mostrar el efecto en el desempeño de la mezcla producto de la disminución de las temperaturas de elaboración y también mostrar el efecto positivo de los aditivos para WMA.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración del personal del LEMIT en el desarrollo del trabajo experimental

Referencias

- [1]. Su K., Maekawa R., Hachiya Y. (2009). Laboratory evaluation of WMA mixture for use airport pavement rehabilitation. *Constr build Mater* 23:2709-2714.
- [2]. Hurley G., Prowell B. (2006). Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. *Assoc Asph Paving Technol* 75:41-90.
- [3]. D'Angelo J., Harm E., Bartoszek J., Baumgardner G., Corrigan M., Cowser J., Harman T., Jamshidi M., Jones W., Newcomb D., Prowell B., Sines R., Yeaton B. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice FHWA Report N° FHWA-PL-08-007.
- [4]. Perkins S. W. (2009). Synthesis of warm mix asphalt paving strategies for use in Montana Highway Construction. FHWA Report N° FHWA/MT-09-009/8117-38.
- [5]. Akisetty C., Lee S., Amirkhanian S. (2009). High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Constr Build Mater* 23:565-573.
- [6]. Akisetty C., Xiao F., Gandhi T., Amirkhanian S. (2011). Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive. *Constr Build Mater* 25:950-956.
- [7]. Kim H., Lee S., Amirkhanian S. (2010). Rheology of warm mix asphalt binders with aged binders. *Constr Build Mater* 25:183-189.
- [8]. Silva H., Olivera J., Peralta J., Zoorob S. (2010). Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Constr Build Mater* 24:1621-1631.
- [9]. Silva H., Olivera J., Peralta E., Ferreira C. (2009). Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders. *Proc. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials Vol. I*: 661-673.
- [10]. Khatri A., Bahía H., Hanson D. (2001). Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyrotory Compactor. *Assoc Asph Paving Technol* 70:368 -401.
- [11]. Bahia H., Hanson D., Zeng M., Zhai H., Khatri M., Anderson R. (2001). Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP 9-10 report 459.
- [12]. FHWA Tech Brief (2011). The multiple stress creep recovery (mscr) procedure. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf>.
- [13]. BS 598 part 110 (1996). Sampling and examination of bituminous mixture for road and other paved areas – Methods of test for determination of wheel tracking rate.
- [14]. Airey G. (2002). Use of the black diagram to identify inconsistencies in rheological data. *Road Mater Pavement Des* 3-4:403-424.
- [15]. D'Angelo J., Kluttz R., Dongré R., Stenphens K., Zanzotto L. (2007). Revision of Superpave high temperature binder specification: the Multiple Stress Creep Recovery Test. *Asph Paving Technol*. 76:123-157.
- [16]. UNE 12697-22 (2006). Bituminous mixtures: Test method for hot mix asphalts, part 22: Wheel tracking test

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA

“Los investigadores y becarios que, financiados por el estado a través de los impuestos, trabajamos en esta temática tenemos la convicción de que las Universidades Públicas y los Centros de Investigación tienen el deber de colaborar en el desarrollo de estrategias que contribuyan a solucionar los problemas de ciudadanos, empresarios y los propios órganos de gobierno. Estas acciones son elementales a la hora de tender a un desarrollo armónico y a la gestión ambiental, un desafío del presente para contribuir con el futuro”

Lic. Roberto Esteban Miguel

En la construcción de las diferentes capas estructurales de pavimentos, tanto flexibles como rígidos, se requieren grandes volúmenes de materiales. Bases y carpetas presentan una oportunidad para reducir significativamente la cantidad de residuo a disponer.

Esta gran oportunidad redundará en beneficios para la sociedad en su conjunto solo a través de la acción responsable de todos los actores que intervienen en la gestión de dichos residuos.

Técnicamente existen muchos materiales reciclados aptos para su utilización en la pavimentación. El más conocido es el material fresado de la pavimentación asfáltica (RAP), el cual luego de una adecuada caracterización es de uso corriente en la pavimentación de nuevas vías o la rehabilitación de las que han llegado a un momento crítico de servicio. De hecho, en algunos países es obligatoria la incorporación de altos porcentajes de RAP en la construcción de nuevos pavimentos y se alienta el reciclado total in situ de las capas asfálticas.

Desde hace más de 20 años, lo mismo sucede a nivel internacional con el polvo de neumáticos fuera de uso (NFU), obtenido por molienda controlada del caucho de este residuo. Su incorporación a los pavimentos es regulada y obligatoria en la generación de nuevos pavimentos.

En cuanto a los agregados pétreos, se ha evaluado en nuestro laboratorio el uso de agregados reciclados producto de la trituración de residuos de la construcción y la demolición (RCD), verificándose la factibilidad de su uso en capas de base, tanto capas asfálticas como estabilizados granulares.

En esta oportunidad, se presentan avances sobre uno de los proyectos que en conjunto realizan desde hace siete años el LEMIT y el CINEA (Centro de investigaciones y estudios ambientales) perteneciente a la Universidad del Centro, con sede en Tandil.

Lo novedoso de este proyecto es que su objetivo es el estudio de la factibilidad de la valorización de arenas descartadas de fundición (ADF) en obras viales, pero no solamente desde el punto de vista técnico, sino como respuesta a una gestión integral de este residuo, es decir, involucrando también a los generadores de los residuos para ofrecerles una alternativa para la disposición responsable de los materiales que desechan.

La valorización de las ADF, adecuadamente caracterizadas, desalentará su uso como material de relleno, contribuyendo al aumento de la vida útil de los actuales sitios de disposición y reduciendo a su vez el consumo de arena silícea natural.

CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE COMO MEDIO PARA LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Marcozzi R., Miguel R.E.

INTRODUCCIÓN

El uso de materiales no tradicionales en la fabricación de concreto asfáltico en caliente es una tendencia constante en las publicaciones científicas a nivel nacional e internacional. Las necesidades de dar uso y valor a materiales que tradicionalmente se descartaban y el paradigma del desarrollo sustentable han contribuido al estudio de la reutilización de materiales descartados de un proceso productivo en la elaboración de pavimentos.

Es común desde hace más de 20 años la incorporación de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en los pavimentos asfálticos, siendo obligatoria en España la disposición de un importante porcentaje del polvo de NFU en pavimentos nuevos. Una rápida búsqueda de publicaciones científicas advierten también sobre el uso de cenizas de incineración (residuos patogénicos en EEUU), polietileno de alta densidad (envases herméticos), residuos de demolición (ladrillos, tejas, hormigones), destapes y mármoles de canteras.

En este sentido, desde el año 2007 el LEMIT junto al CINEA UNCPBA han estudiado el uso de arenas descartadas de fundición en concreto asfáltico en caliente. Las arenas descartadas de fundición (ADF) son el principal residuo generado en esta actividad industrial. Las industrias de fundición elaboran piezas de metales ferrosos y no ferrosos que abastecen un amplio mercado, como el automotriz, naval, minero, petróleo, máquinas y herramientas entre otros. Las fundiciones confeccionan moldes en arena silíceo que copian en su interior las dimensiones del elemento a producir. Para unir los granos de arena se utilizan aglomerantes como arcilla (bentonita) y resinas orgánicas. Estas últimas son de origen fenólico uretánicas, furánicas o novalacas (Dungan and Reeves,

2005) y se aplican cuando la complejidad de las piezas no permite un moldeo con el sistema de arcilla. En las Figuras 1a, b y c se presentan los moldes elaborados con diferentes tipos de aglomerantes.

Las arenas utilizadas para confeccionar moldes y noyos –fracciones de arena aglomerada que forman los huecos en el interior de las piezas– poseen una granulometría controlada y son reutilizadas dentro del proceso productivo de fundición. Sin embargo la reutilización tiene límites técnicos y a fin de evitar defectos en los productos una fracción de la arena debe ser descartada y se transforma en arena descartada de fundición (ADF).

Se estima que el sector de la fundición en el mundo utiliza y descarta anualmente unas 100 millones de toneladas de arena (Carnin et al. 2012). En Argentina se generan y descartan anualmente unas 189.000 toneladas de ADF.

Este material ha sido tradicionalmente descartado como inerte y dispuesto en cavas de canteras, ladrilleras o terrenos bajos (Miguel et al, 2009). En las Figuras 2a y b puede observarse la disposición de ADF junto con otros residuos de fundición.

Las presiones de los organismos de contralor han conllevado a que parte de las ADF se dispongan en rellenos sanitarios e inclusive rellenos de seguridad. Actualmente, la escasa disponibilidad de sitios para disposición final de inertes y los costos de disposición en relleno sanitario o de seguridad acrecientan la necesidad de encontrar alternativas para el uso de este residuo.

La poca información disponible sobre las características químicas de los ADF limitó significativamente la toma de decisión para el uso como subproducto de las ADF en



Fig. 1. Moldes de fundición confeccionados con distintos aglomerantes a) Shell, b) Arena verde (arcilla) y c) Alkid uretánico.

otros procesos productivos. No obstante, en los últimos años varias publicaciones advierten que las ADF deben considerarse en su mayoría residuos no especiales debido a las bajas concentraciones de metales y compuestos orgánicos presentes en matriz y en lixiviado (Deng, 2009, Dungan y Dees, 2009, Miguel et al, 2012a y b).



Fig. 2. Áreas rellenas con arenas descartadas junto a otros residuos a) ADF junto a otros residuos de fundición, b) ADF junto a otros residuos urbanos.

Paralelamente, varias publicaciones demuestran la viabilidad técnica de su uso como materiales de construcción en concreto asfáltico en caliente (Bonet, et al., 2002; Guney et al., 2006; Marcozzi et al., 2008), en hormigones (Sota et al., 2007; Siddique, 2009), en la fabricación del cemento Pórtland compuesto (Elizalde, 2009), en bases y subbases de suelos (Appoloni et al, 2010) y en suelos para agricultura (Lindsay & Logan, 2005).

En Estados Unidos, cerca de 3 millones de toneladas anuales de ADF son beneficiosamente aprovechadas en otros procesos productivos (Dayton et al 2009) y se continúan los esfuerzos en pos de tender a la gestión integral del residuo, valorizándolo y evitando su disposición final.

A continuación se presentan dos trabajos publicados, el primero –divulgado en la Revista Infraestructura Vial de Costa Rica Vol. 10. Nro. 20– evalúa el comportamiento técnico y ambiental del uso de cinco arenas descartadas de fundición en concreto asfáltico en caliente. El segundo –presentado en el XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito del año 2012– analiza los beneficios ambientales

del uso de arenas descartadas a través del análisis de ciclo de vida.

Ambos trabajos han sido modificados parcialmente a fin de mantener una coherencia con el resto del documento y evitar repeticiones innecesarias.

CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE: UN MEDIO PARA LA VALORIZACIÓN DE ARENAS DESCARTADAS DE FUNDICIÓN

El programa experimental plantea, desde el punto de vista técnico, la comparación de los parámetros que caracterizan el comportamiento de una mezcla asfáltica cuando uno de los materiales de su dosificación, en este caso la arena silícea de río, es reemplazado por arenas descartadas silíceas utilizadas en distintos procesos de fundición.

Desde el punto de vista ambiental, el diseño plantea la determinación de elementos lixiviados desde las ADF y luego desde las mezclas asfálticas con reemplazo de arena silícea natural por ADF.

Desarrollo Experimental

Materiales

En el presente trabajo se utilizó un cemento asfáltico convencional clasificado como CA-30 cuya viscosidad a 60 °C fue de 3250 dPa.seg, evaluada con viscosímetro rotacional (IRAM 6837 – ASTM D 4402).

Los agregados pétreos comprenden fracciones comerciales de granito triturado proveniente de canteras de la ciudad de Olavarría, Provincia de Buenos Aires.

La arena silícea de río (comercial) se considerará arena patrón y será reemplazada por ADF en la dosificación.

Las ADF utilizadas poseen diferentes características dependiendo del proceso productivo del que formaron parte. Si bien la base principal es la arena silícea de río la incorporación de aglomerantes específicos, metal fundido y su manejo interno hacen variar sus características físicas y químicas.

En la Tabla 1 se especifican los factores que influyen en sus propiedades, como el tipo de moldeo, la relación aglomerante/arena, tipo de metal fundido y la recirculación interna. Estas variaciones en sus propiedades podrían alterar la reología del concreto asfáltico que incorpore ADF en su composición.

En la Figura 3 y la Tabla 2 se presentan las granulometrías de la arena silícea patrón y de las ADF.

La granulometría de las ADF puede ser muy diferente de la granulometría de la arena que le dio origen ya que será función del aglomerante que requiera el proceso de fundición, de la energía utilizada para la molienda cuándo ésta es requerida, de la etapa del proceso productivo en la que es descartada etc.

Tabla 1. Origen de las ADF estudiadas.

	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5
Metal fundido	Aluminio	Hierro	Hierro Gris	Hierro Gris	Hierro Gris
Tipo de Moldeo	Arena de río aglomerada por resina	Arena de río aglomerada por resina	Arena de río aglomerada mecánicamente	Arena de río aglomerada por resina	Arena de río aglomerada por resina
Aglomerante	Resina alkydica de reacción poliuretánica	Resina Fenol formol liquida	Bentonita y carbón mineral	Resina Fenol formol liquida autofraguante	Resina Fenol formol liquida autofraguante
Aglomerante / arena (% p en p)	1,25 - 2,25 en 100	2 - 3 en 100	10 en 100	1,6 en 100	1,6 en 100
Sistema de Moldeo	Manual en caja	No disponible	Semi- automático	Automático sellado con yeso	Automático sellado con yeso
Tipo de Producción	Discontinua, baja producción	No disponible	Continua en grandes series de producción	Continua en grandes series de producción	Continua en grandes series de producción
Recirculación	Recirculación en el orden de 40 %	No disponible	Recirculación en el orden de 90 %	Descartada sin recirculación	Recuperada para recirculación
Características físicas	- Desagregada/ agregada en terrones - Requiere trituración	- Desagregada - Pequeñas partículas de hierro	- Desagregada - Pequeñas partículas de hierro	Desagregada / agregada en terrones - Vestigios de yeso	Desagregada / agregada en terrones - Vestigios de yeso

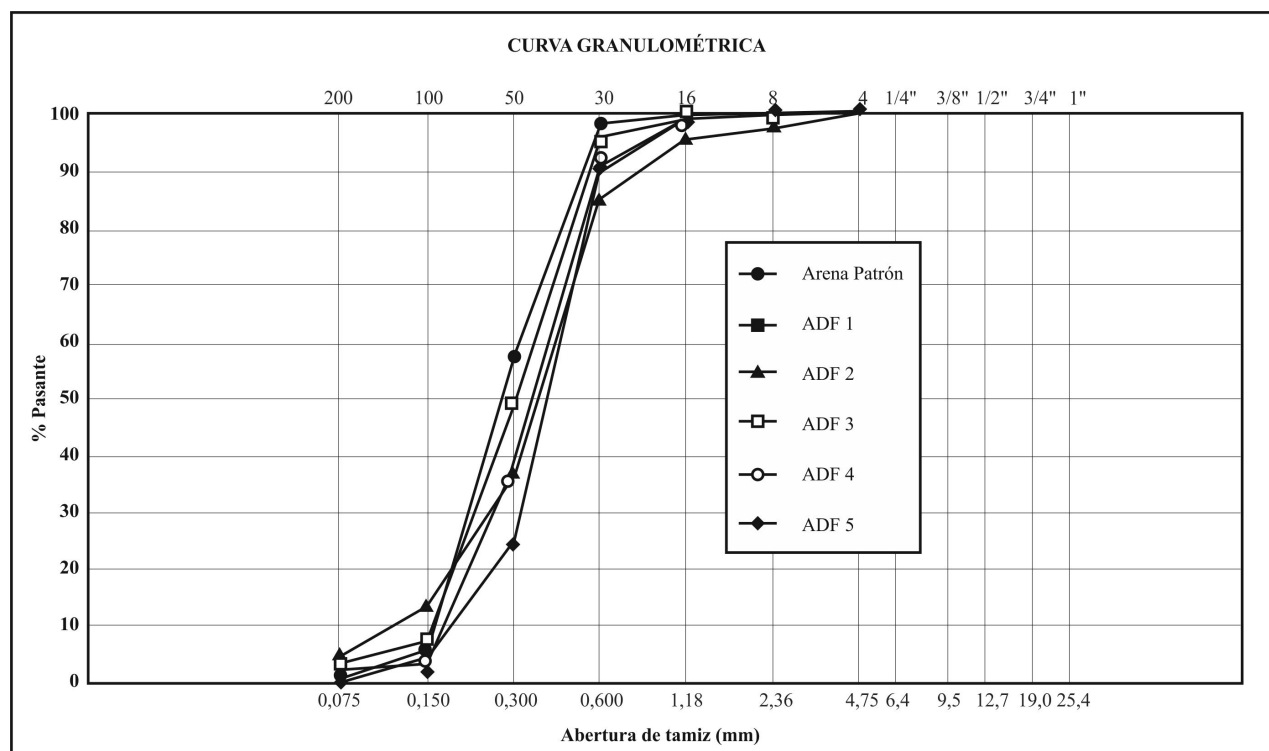


Fig. 3. Curvas granulométricas de las arenas estudiadas.

Tabla 2. Granulometrías de la arena patrón y las ADF.

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
Arena Patrón	100	100	100	100	100	100	99	98	58	6.1	1.0
ADF 1	100	100	100	100	100	100	99	92	37	4.2	0.2
ADF 2	100	100	100	100	100	98	96	85	37	13.2	4.9
ADF 3	100	100	100	100	100	100	99	96	49	7.3	3.0
ADF 4	100	100	100	100	100	100	99	88	25	3.1	2.0
ADF 5	100	100	100	100	100	100	99	91	25	1.8	0.9

Del análisis de los resultados se destaca que:

- en todos los casos evaluados el material es un poco más grueso que la arena silícea patrón,
- en algunos casos el material es más limpio que la arena silícea patrón y en otros tiene mucho más finos pasantes por el Tamiz N° 200,
- a su vez, los finos presentes son de naturaleza muy diferente.

En la Tabla 3 se presentan características relacionadas con la forma y la composición de las arenas en estudio. Mediante la determinación de los porcentajes de vacíos no compactados (AASHTO T-304) se evaluó su angularidad. Las fotografías muestran las diferencias entre las composiciones de la arena patrón y los ADF.

Diseño de mezcla asfáltica experimental

La dosificación de la mezcla asfáltica de referencia corresponde a la carpeta de rodamiento de una Ruta de la Provincia de Buenos Aires en seguimiento desde su construcción en el año 2001, Tabla 4

Al comparar las curvas granulométricas del diseño con arena silícea patrón (diseño de la Ruta Provincial existente) con las curvas granulométricas obtenidas al reemplazar dicho material por las diferentes ADF se encuentra que la tolerancia especificada por el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (PETG, DNV, 1998) no es cumplida en

algunos casos, como puede verse en las casillas resaltadas de la Tabla 5.

Debido a que un reemplazo parcial de las arenas complica la operatividad de una planta asfáltica se decidió continuar con el 100% del reemplazo, como primer paso, y, en caso de verificarse la factibilidad del proyecto, dejar la discusión de la tolerancia para especificaciones particulares.

El diseño original utilizó el Método Marshall con probetas de 50 golpes del pisón por cara con lo que se obtuvo un contenido óptimo de cemento asfáltico del 5% en mezcla. Las temperaturas de trabajo fueron de 160 °C para el mezclado y 149 °C para la compactación, correspondientes a las definidas por los rangos de equiviscosidad con valores medios de 0.17 y 0.28 Pa.s., respectivamente.

Se verificó que los parámetros volumétricos de las probetas compactadas con la mezcla con reemplazo de arena no presentan diferencias estadísticamente significativas con aquellos del diseño original, con un 95 % de confianza.

Análisis de Datos

Parámetros de comportamiento evaluados desde el punto de vista técnico

En la Tabla 6 se presentan los valores medios de distintos parámetros de comportamiento evaluados sobre probetas de la mezcla de agregados y asfalto dosificada según

Tabla 3. Forma y composición de las arenas utilizadas

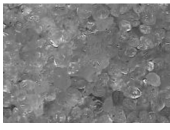
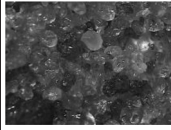
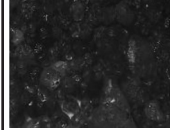
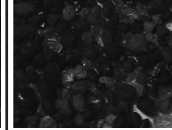
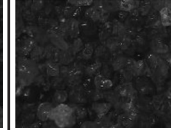
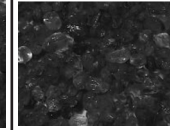
	Arena Patrón	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5
Angularidad del árido fino, % (AASHTO T-304)	41.1	44.7	38.6	41.9	43.0	41.7
Composición de las arenas						

Tabla 4. Dosificación del concreto asfáltico

Tipo de árido	6-20	0-6	Arena silícea	Cal	Asfalto	
% Árido	42	45	11	2	----	100
% en Mezcla	39.9	42.8	10.4	1.9	5.0	100

Tabla 5. Composición de las curvas granulométricas de los concretos asfálticos

	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
CURVA ORIGINAL	100	99	92	84	61	44	35	29	19.7	10.3	7.2
Reemplazo de AS por ADF 1	100	99	92	84	61	45	35	28	17.4	10.1	7.2
Reemplazo de AS por ADF 2	100	99	92	83	59	44	35	28	17.2	10.8	7.4
Reemplazo de AS por ADF 3	100	99	92	84	61	45	35	28	18.7	10.5	7.5
Reemplazo de AS por ADF 4	100	99	92	84	61	45	35	28	16.1	10.0	7.4
Reemplazo de AS por ADF 5	100	99	92	84	61	45	35	28	16.0	9.9	7.2
LÍMITES DE TRABAJO (Tolerancia PETG DNV)	-	-	97	89	65	48	38	32	23	13.3	9.2
	-	94	87	79	57	40	32	26	17	7.3	5.2

Tabla 4 con la arena sílicea patrón y las diferentes ADF en estudio.

Con la hipótesis de igualdad de comportamiento ante el reemplazo de la arena patrón por las respectivas ADF se realizó el análisis estadístico de los datos. Se muestra en la misma Tabla 6 si existieron o no diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las muestras, para un nivel de confianza del 95%.

Se han realizado también dos tipos de ensayos de ahuellamiento: el Wheel Tracking Test (metodología: B.S. 598 parte 10-1996) y el Hamburgo Wheel Tracking Test (metodología: AASHTO T-324). Los valores presentados pertenecen a las curvas de tendencia de la curva promedio de al menos dos probetas.

El ensayo de Rueda Cargada (Wheel Tracking Test, WTT) se realizó según lo siguiente: una probeta prismática de 0.3x0.3x0.05 m de mezcla asfáltica compactada a la densidad de diseño se somete a ciclos de pasadas de una rueda cargada dentro de una cámara que mantiene la temperatura del sistema a 60 °C. Durante el ensayo se adquieren los datos de profundidad de huella los cuales serán analizados al concluir el ensayo al cabo de 120 minutos.

En la Tabla 7 se presentan comparativamente los resultados de los ensayos de ahuellamiento realizados.

Los concretos con ADF 1, ADF 3 y ADF 4 resultaron notablemente menos deformables que el concreto con la arena patrón, lo cual puede deberse a los procesos de molienda para los ADF 1 y 4 (ver angularidades Tabla 3) y a las propiedades del filler (carbón mineral) del ADF 3.

El concreto con ADF 2 presenta comportamiento muy similar al patrón.

El concreto con ADF 5 si bien generó menores valores de profundidad de huella presenta una estabilidad dinámica del orden de la estabilidad dinámica del patrón.

Debido a la gran influencia que tiene la forma y textura de las partículas en los parámetros de ahuellamiento el ensayo de rueda cargada presenta gran sensibilidad para mostrar diferencias en el comportamiento de estos concretos asfálticos en caliente cuando una arena patrón de partículas redondeadas y lisas es reemplazada por arenas que han sufrido tratamientos térmicos y mecánicos de diferentes naturalezas.

Además de la estructura de agregados pétreos (granulometría y vacíos en el agregado mineral), de su forma y su textura, los parámetros de ahuellamiento con concreto asfáltico son función en mayor o menor medida del contenido y la viscosidad del asfalto que contiene.

Se han realizado extracciones del asfalto presente en las muestras de concreto asfáltico ensayados, determinando penetración y viscosidad y su relación con el asfalto original, según lo que se presenta en la Tabla 8.

En algunos casos puede verse que el asfalto recuperado del concreto asfáltico con diferentes ADF no cambia su reología en la misma medida que el asfalto recuperado de la mezcla con la arena patrón, evaluado a través de su relación de viscosidades. Estos cambios en el ligante, sin embargo, no explican de forma directa las variaciones de comportamiento de las mezclas asfálticas en los ensayos de ahuellamiento, demostrando la importante influencia

Tabla 6. Parámetros mecánicos de comportamiento

Parámetro	Normativa	AS	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5
Estabilidad Marshall [N]	ASTM D 6927-06	16012	16727	14089	13565	14355	11186
		---	NO	NO	NO	NO	SI
Fluencia Marshall [mm]	ASTM D 6927-06	4.2	3.9	3.1	3.3	3.3	2.5
		---	NO	SI	SI	SI	SI
Relación E/F [N/mm]	-----	3812	4289	4545	4110	4350	4474
		---	NO	NO	NO	NO	NO
Resistencia a tracción 25 °C, [kPa]	ASTM D 6931-07	1746	1765	1509	1474	1644	1387
		---	NO	SI	SI	NO	SI
Módulo de rigidez, 20 °C, [MPa]	EN 12697-26:2004 Anexo C	6574	6321	7168	7746	8051	7404
		---	NO	NO	NO	SI	NO
Efecto de la humedad (24 h a 60 °C), [%]	ASTM D 4867/ D4867M-04 o AASHTO T-283	91	83	80	92	92	95
		---	NO	SI	NO	NO	NO
Efecto de la humedad (16 h a -18 °C + 24 h a 60 °C), [%]		88	83	79	89	89	93
	---	NO	NO	NO	NO	NO	

Tabla 7. Comparación de parámetros de ahuellamiento del tramo final del ensayo.

	AS	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5
Relación de deformaciones [mm/min]	0,0243	0,0105	0,0232	0,0106	0,0108	0,0151
Estabilidad Dinámica [pasadas/mm]	1729	4015	1807	3980	3882	2776
Deformación Máxima en 120 min [mm]	6.04	3.42	5.45	2.83	3.54	4.08

del reemplazo del agregado en la determinación de los parámetros de dicho ensayo.

El ensayo de Rueda Cargada bajo Inmersión (Hamburgo Wheel Tracking Test, HWTT) pretende simular el estado de tránsito en carpeta saturada de agua.

Los parámetros del ensayo HWTT (Tabla 9) son el número de pasadas que indican un cambio en las condiciones de deformación o el inicio teórico del deterioro debido al daño progresivo del agua y el número de pasada que indica que la huella alcanzó el valor de 12.5 mm.

Parámetros de comportamiento evaluados desde el punto de vista ambiental

Al trabajar con materiales considerados como residuos industriales se hace necesario determinar su peligrosidad o no mediante determinaciones de laboratorio. El Anexo

IV y VI del Decreto 831/93 de la Ley Nacional 24.051 especifica el Ensayo de Lixiviabilidad para evaluar si los residuos, en caso de ser dispuestos en condiciones no apropiadas, pueden originar lixiviados cuyos constituyentes nocivos alcancen concentraciones por encima de los parámetros establecidos.

En la Tabla 10 se presentan las concentraciones obtenidas en lixiviados de ADF y se comparan con los límites máximos establecidos en la Ley 24.051. Las extracciones de lixiviado se realizaron en un laboratorio externo siguiendo los lineamientos de la normas EPA SW-846 Método 1310 modificado.

De los lixiviados evaluados, el extraído del ADF 3 posee características que permiten considerarlo como residuo peligroso ya que las concentraciones de plomo, cadmio y cobre superan los límites máximos estipulados en los Anexos IV y VI del Dto. 831/93 de la Ley 24.051.

Tabla 8. Evaluación de los asfaltos recuperados de mezclas asfálticas ensayadas

Ensayos sobre asfalto recuperado	Penetración 25 °C, 100g, 5s [0.1 mm]	Punto de ablandamiento [°C]	Ductilidad 25 °C [cm]	Viscosidad 60 °C, 2 rpm [poises]	Relación $\frac{PEN_{ORIG}}{PEN_{RECUPE}}$	Índice de envejecimiento $\frac{VIS_{RECUPE}}{VIS_{ORIG}}$
Concreto con AS	38	55.2	+150	4960	1.37	1.53
Concreto con ADF 1	43	54.0	+150	4280	1.21	1.32
Concreto con ADF 2	47	53.4	+150	3880	1.11	1.19
Concreto con ADF 3	48	---	+150	3800	1.08	1.17
Concreto con ADF 4	59	54.6	+150	3440	0.88	1.06
Concreto con ADF 5	43	57.8	+150	5000	1.21	1.54
Sobre asfalto original	52	52.6	+150	3250	---	---

Tabla 9. Comparación de parámetros de ahuellamiento bajo inmersión en agua a 50 °C

	AS	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5
Nº de pasadas para intersección de pendientes de deformación y desprendimiento	2700	3400	2900	4100	3450	2350
Nº de pasadas para alcanzar un ahuellamiento de 12.5 mm.	3650	4150	4150	5050	4600	3270

Tabla 10. Concentración de elementos mg/L en lixiviado de muestras de ADF

	AS	ADF 1	ADF 2	ADF 3	ADF 4	ADF 5	Límites Ley 24.051
Fenoles	<0,1	<0,1	----	----	<0,1	<0,1	0.10
Cd	<0,002	<0,002	----	1,4	<0,002	<0,002	0.50
Cr	<0,003	<0,003	----	0,3	<0,003	<0,003	1.00
Cu	0,002	0,030	----	15,2	0,002	<0,002	1.00
Ni	<0,008	<0,008	----	1,30	----	----	1,34
Pb	<0,02	0,07	----	7,2	<0,02	<0,02	1.00
Zn	0,020	0,108	----	4,9	0,011	0,024	500

Nota: En etapas posteriores, esta muestra fue evaluada en otro laboratorio externo y los resultados han mostrado valores muy por debajo de los niveles informados en las primeras determinaciones. Debido a que forman parte de datos publicados se han mantenido dichos valores en esta presentación, pero esta situación nos alerta sobre la imperiosa necesidad de contar con laboratorios de calidad y experiencia comprobada al momento de efectuar determinaciones que pueden enmarcan un residuo como peligroso o no.

Si el ADF a incorporar como materia prima o insumo en un proceso productivo es considerado por el Organismo de Contralor como Residuo Peligroso su utilización deberá ser cuidadosamente evaluada a fin de garantizar que el residuo se haya fijado eficazmente en la matriz del producto elaborado. La Provincia de Buenos Aires en su Ley 11.720 de Residuos Especiales establece, a través del Decreto Reglamentario 228/98, los requisitos técnicos y de gestión necesarios para incorporar residuos con características especiales o peligrosos en otros procesos productivos.

Sin embargo, si se comprueba que un ADF es residuo industrial no peligroso su utilización como insumo o materia prima en otros procesos productivos se agiliza por no existir instrumentos legales que actualmente así lo reglamenten.

Es importante, entonces, remarcar la adecuada caracterización de los ADF ya que esto define las acciones necesarias para su adecuada gestión y valorización. Si un ADF caracterizado como peligroso es utilizado sin intervención de un Organismo de Contralor se puede incurrir en sanciones penales y administrativas, tanto para el generador (responsable del manejo y disposición del residuo) como para quien lo utiliza como materia prima.

Las muestras de concreto asfáltico obtenidos en laboratorio se sometieron también al ensayo de lixiviación EPA SW-846 Método 1310 modificado, para obtener así las determinaciones en el extracto de fenoles y metales pesados (Tabla 11).

De los datos disponibles se observa que las mezclas asfálticas elaboradas con ADF 1, 2, 4 y 5 no poseen concentraciones en lixiviado por encima de los parámetros establecidos por la Ley 24.051. En referencia a la mezcla RAF 3, se detectaron 3,9 mg/l de plomo en lixiviado, concentración por encima del límite establecido de 1 mg/l. No es esperable la presencia de plomo en estos resultados

ya que en caso de no resultar encapsulada la carga contaminante que aporta el residuo RAF 3 en el lixiviado de la mezcla asfáltica es del orden de los 0,75 mg/l (10,45 % del total de la mezcla).

Es importante destacar que deben realizarse repeticiones de estos ensayos con una frecuencia tal que garantice la caracterización del material y el origen de las concentraciones detectadas.

Conclusiones

- Desde el punto de vista técnico los ensayos no indican cambios significativos en la mayoría de las propiedades mecánicas analizadas cuando se reemplaza la arena silícea del diseño por las ADF estudiadas.

- En algunos casos se aprecian cambios significativos en las propiedades cohesivas (resistencia a tracción).

- En un solo caso hay diferencia entre condiciones de adherencia evaluadas mediante el daño por efecto de la humedad.

- Los concretos asfálticos con ADF presentan al menos el mismo comportamiento frente al ahuellamiento, en seco y bajo inmersión, que la mezcla con arena patrón.

- Desde el punto de vista ambiental los concretos asfálticos con ADF presentan también similar comportamiento desde el punto de vista ambiental que el concreto asfáltico en caliente con arena patrón en cuanto a la lixiviación de los compuestos determinados.

- En esta parte del estudio se han utilizado solamente ensayos de lixiviación por ser una de las metodologías requerida para caracterizar un residuo. Si bien dicho ensayo está muy documentado tiene alcance para rellenos sanitarios y no registra antecedentes para ninguna aplicación en pavimentos. Se prevé, por tanto, el estudio de diferentes metodologías para una evaluación racional de su potencial transferencia al medio ambiente si formara parte de diferentes capas estructurales de pavimentos, tanto flexibles como rígidos.

- Se considera como punto a investigar la incorporación de ensayos que evalúen los mecanismos de fijación de los contaminantes.

- Este trabajo es concluyente en cuanto a la necesidad de caracterizar los ADF como residuo industrial peligroso o

Tabla 11. Concentración de elementos mg/L en lixiviado de muestras de ADF

	Con AS	Con ADF 1	Con ADF 2	Con ADF 3	Con ADF 4	Con ADF 5	Límites Ley 24.051
Fenoles	<0,1	---	---	---	< 0,1	<0,1	0,10
Cd	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<0,002	0,50
Cr	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,003	<0,003	1,34
Cu	0,002	---	---	0,06	< 0,002	< 0,002	1,00
Ni	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	---	---	1,00
Pb	<0,03	<0,03	<0,03	3,9	<0,02	<0,02	1,00
Zn	0,02	---	---	0,02	0,008	0,008	500

no peligroso previamente a su utilización como materia prima o insumo en otros procesos productivos, para ello, es necesario contar con la expedición correspondiente por parte del organismo de contralor. De esta forma, tanto el generador como quién incorpora el residuo a su proceso productivo tiene la seguridad de estar gestionándolo convenientemente, contribuyendo a valorar un residuo.

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LAS ARENAS DESCARTADAS DE FUNDICIÓN VALORIZADAS EN CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE

¿Qué representa un Análisis de ciclo de vida?

Desde el comienzo de un proceso de producción hasta su finalización pueden identificarse las instancias y los procedimientos con implicancias en el ambiente desde lo “ecológico”, social y económico.

Una metodología para el estudio de un material y su uso desde la obtención, durante su manejo y vida útil y hasta su descarte, es el análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de material, energía y los vertidos al entorno para determinar su impacto en el ambiente y evaluar y poner en práctica estrategias de mejora ambiental (Consoli et al., 1993).

Debido a que este análisis es una representación de la realidad basada en un conjunto de datos disponibles, su validez dependerá de la disponibilidad y calidad de los datos (Potti, 2010).

Con el propósito de analizar el uso de ADF en concreto asfáltico (CAC) de forma integral se evaluará el ciclo de vida al considerar los subsistemas económico, ecológico, social y normativo. Los resultados del trabajo podrán ser utilizados como criterio de selección de alternativas responsables en el uso de materias primas en la

construcción de pavimentos.

Metodología

Limites del sistema para el ciclo de vida de arena silícea

Determinar los límites del sistema de análisis es clave en un ACV, para ello se analizó el flujo de la arena silícea desde la colección de la arena en yacimiento, su transporte, uso en el proceso de fundición y posterior gestión por fuera de la industria (Figura 4).

Aquí se consideró que la ADF puede ser enviada a disposición final en relleno no controlado, relleno sanitario o relleno de seguridad. Como alternativa a esta modalidad se planteó la valorización de ADF en reemplazo de arena silícea natural utilizada en CAC.

Características químicas de ADF

Con el propósito de aplicar el ACV para ADF se procedió a caracterizar una muestra. La arena de fundición proviene de una industria de fundición de aluminio que utiliza en su proceso productivo una resina alquídica poliuretánica al 1 % en peso de arena silícea. La empresa recicla la arena en el orden de un 40 %.

Para evaluar la peligrosidad de la ADF, la muestra fue sometida al método de lixiviación EPA SW 846 1310B requerido en la Ley de Residuos Peligrosos 24.051 Decreto 831/93 Anexo VI. Los resultados presentados en la Tabla 12 indican que el residuo, en concordancia con los antecedentes nacionales e internacionales, no debería ser considerado residuo peligroso ya que los elementos determinados se encuentran por debajo de los límites de la Ley. Paralelamente las concentraciones en el lixiviado de la arena silícea natural son similares a las detectadas en ADF.

Uso de ADF en CAC en reemplazo de arena silícea natural

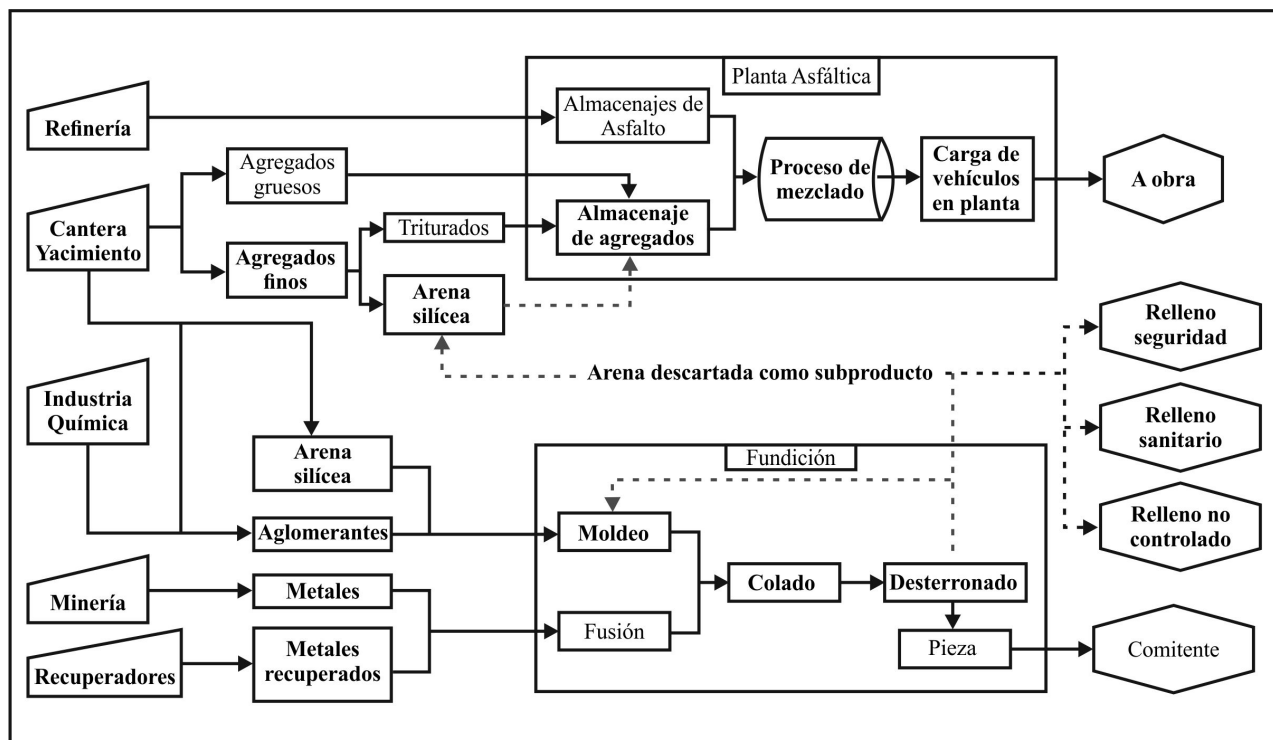


Fig. 4. Flujo de la arena silícea utilizada en fundición y CAC

La muestra de ADF ha sido estudiada en laboratorio para el reemplazo de la fracción de arena silícea que incorpora un CAC utilizado como patrón.

Durante estos últimos años se han estudiado diferentes tipos de ADF para su valorización en CAC y otros materiales viales. En el presente trabajo y a manera de ejemplo utilizaremos los resultados del uso de uno de ellos.

Sobre este material se realizaron los ensayos de caracterización habituales, tales como composición granulométrica (Tabla 13), peso específico y equivalente arena (Tabla 14).

El ADF es ligeramente más grueso que la arena silícea patrón y tiene menos material de tamaño menor a 0,075mm.

Además de los parámetros mencionados, en la Tabla 14 se presentan características relacionadas con la forma. Se determinó la angularidad mediante los porcentajes de vacíos no compactados (AASHTO T-304).

El CAC de referencia corresponde a la carpeta de rodamiento de una Ruta Provincial en seguimiento desde su construcción en 2001. El reemplazo de la arena silícea por la ADF en estudio no afecta significativamente la curva granulométrica de la dosificación.

En la Tabla 15 se presentan los valores medios de distintos

parámetros de comportamiento evaluados sobre probetas de la mezcla de agregados y asfalto dosificada.

Para los primeros 6 parámetros presentados en la Tabla 15, el análisis estadístico de los datos con la hipótesis de igualdad de comportamiento ante el reemplazo de la arena patrón por la ADF, indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las muestras, para un nivel de confianza del 95%.

En cuanto al ensayo de ahuellamiento, la mezcla con ADF resulta menos deformable que la mezcla con la arena patrón.

La mezcla con ADF también presenta mejor comportamiento frente al ensayo Hamburgo ya que aumenta el número de pasadas necesarias para el inicio del desprendimiento de la película de asfalto, parámetro relacionado directamente con la durabilidad del pavimento.

Discusiones y resultados

El uso de arenas descartadas de fundición como subproductos en concreto asfáltico en caliente genera múltiples beneficios hacia los subsistemas físico natural, económico, social y normativo. A continuación se efectúa un punteo y explicación de cada uno para posteriormente reflejarlos en un ejemplo de aplicación.

- *Subsistema físico-natural:*

- Reducción del consumo de arena natural como recurso

Tabla 12: Concentración de analitos en lixiviado de arena silícea y ADF en comparación con los límites de la Ley de Residuos Peligrosos.

Analitos mg.l-1	Arena natural	ADF	Ley 24.051
Fenoles	< 0,1	< 0,1	0,1
Cd	< 0,002	< 0,002	0,5
Cr	< 0,003	< 0,003	5
Cu	0,002	0,030	100
Ni	< 0,008	< 0,008	1,34
Pb	< 0,02	0,07	1,00
Zn	0,020	0,108	500

Tabla 13: Granulometrías de la arena patrón y la ADF.

Tamiz	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,3 mm	0,15 mm	0,075 mm
Arena Patrón	100	100	99	98	58	6.1	1.0
ADF	100	100	99	92	37	4.2	0.2

Tabla 14. Forma y composición de las arenas utilizadas

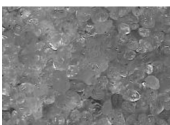
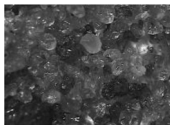
	Arena Patrón	ADF
Composición de las arenas		
Angularidad del árido fino, % (AASHTO T-304)	41.1	44.7
Peso específico bruto (VN E14)	2,634	2,593
Equivalente arena, % (VN E10)	78	84

Tabla 15. Parámetros mecánicos de comportamiento

Parámetro de comportamiento (Valores medios)	Normativa	Arena patrón	ADF
Estabilidad Marshall, N	ASTM D 6927-06	16012	16727
Fluencia Marshall, mm	ASTM D 6927-06	4.2	3.9
Relación E/F, N/mm	-----	3812	4289
Resistencia a tracción 25 °C, kPa	ASTM D 6931-07	1746	1765
Módulo de rigidez 20 °C, MPa	EN 12697-26:2004 Anexo C	6574	6321
Daño inducido por humedad, % - 24 h a 60 °C - 16 h a -18 °C + 24 h a 60 °C	ASTM D 4867/ D4867M-04 o AASHTO T-283	91 88	83 83
Ensayo de ahuellamiento, 60 °C - Estabilidad dinámica, pasadas/mm - Def. máxima, mm	BS 598	1729 6,04	4015 3,42
Ensayo de Hamburgo, 50 °C - Punto teórico de desprendimiento - N° pasadas para def. 12.5mm	AASHTO T 324	2700 3650	3400 4150

natural no renovable y su reaprovechamiento como materia prima en otro proceso productivo.

- Disminución de gases efecto invernadero asociado al combustible utilizado para la extracción y transporte de arena hacia los centro de acopio.
- Aumento de la vida útil de rellenos sanitarios de residuos sólidos domiciliarios al evitar la disposición de ADF.
- Reducción del volumen de ADF a disponer como residuos inertes en espacios destinados para tal fin.

• *Subsistema económico:*

- Generación de un mercado de residuos aún no aprovechado.
- Reducción de costos de disposición final del empresario fundidor.
- Reducción de costos de arena silícea natural en planta asfáltica.
- Durabilidad del CAC con ADF al menos igual que el CAC sin ADF.

• *Subsistema social:*

- El envío de ADF como subproducto en CAC puede ser utilizado por la fundidora y la planta asfáltica como acciones de responsabilidad social empresaria.

• *Subsistema normativo:*

- Se tiende a la gestión integral de un “residuo” al transformarse en un “subproducto” para otro proceso productivo en concordancia con la Ley de Gestión Integral de Residuos Industriales y actividades de servicios.
- Las autoridades de aplicación podrán realizar la gestión de un “residuo” al que antes no se podía gestionar integralmente.
- Las industrias de fundición deben gestionar como residuo industrial peligroso sólo aquella fracción de residuos considerada como tal. Se evita el descarte de residuos peligrosos enmascarados en los grandes volúmenes de ADF como tambores de resinas, restos de barro de lavado de gases, entre otros.

Ejemplo de aplicación de ADF en CAC y su ACV

A fin de evaluar las implicancias ambientales del uso de ADF en CAC, se considerará un tramo de construcción

de una carpeta de rodamiento de 5 cm de espesor, sobre dos trochas de 7,5 m de ancho en total y una longitud de 50 Km.

La vida de servicio de la obra se estima en 20 años.

El volumen total de material compactado en obra será de 18750 m³ con un peso de 45.000 toneladas (densidad de 2400 kg/m³). Si se considera que el CAC posee un contenido de arena silícea en mezcla de 10,4 % en peso, se necesitarán en obra 4680 Tn de arena, es decir 93,6 Tn de arena por kilómetro.

En este caso, los beneficios para cada subsistema serian los siguientes:

• *Subsistema físico-natural:*

- Reducción del consumo de arena natural de 4680 Tn.
- Si se considera el transporte de 4680 Tn de arena silícea en camiones desde yacimiento a la obra suponiendo una distancia de 30 Km, sumaria una distancia recorrida de aproximadamente 12.000 Km. Evitar el transporte reducirá unas 10 Tn de CO₂ emitido junto a otros gases producto de la combustión de gasoil de camiones.
- Se reducirá un volumen aproximado de 3100 m³ en sitios de disposición final controlados y no controlados. Este volumen equivale, en caso de residuos sólidos urbanos domiciliarios, a unas 1550 Tn, es decir el espacio que necesita una población de 10.000 habitantes para disponer sus residuos sólidos urbanos durante un período de 0,5 años. Este período de tiempo es un indicador del aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios.
- Se valorizará un 2,4 % del total de ADF generados en el país (promedio 189 mil toneladas año)

• *Subsistema económico:*

- A la fecha de entrega de este trabajo (Julio de 2012), para grandes obras el costo de la tonelada de arena silícea puesta en obra de setenta pesos. Para la obra en cuestión, el costo de arena es de 327.600 pesos. La utilización de ADF reducirá estos costos solamente al costo desde fundición a obra al transporte.
- Reducción de costos de disposición final del empresario fundidor, el transporte a relleno no controlado ronda los 20

pesos la tonelada (\$ 93.600 para 4680 Tn). El transporte e ingreso a disposición final en relleno sanitario, 120 pesos por tonelada (\$ 561.600 para 4680 Tn).

- La durabilidad de CAC con ADF para el residuo estudiado es superior a la del CAC elaborado con arena patrón. Este beneficio es difícil de conmensurar debido al alcance del trabajo.

• *Subsistema social:*

- El envío de ADF como subproducto en CAC puede ser utilizado por la fundidora y la planta asfáltica como acciones de responsabilidad social empresarial. Estas acciones deberán integrarse dentro de un sistema de gestión ambiental adaptado a la política ambiental de cada una de las empresas.

En el caso del subsistema normativo, se consideran los beneficios estipulados para el apartado anterior.

En caso que el total de ADF generadas en el país pueda ser valorizado en CAC, y que su comportamiento sea comparable con el estudiado, los beneficios en el ciclo de vida y en el ambiente serían significativamente superiores. En la Tabla 16 se presentan las toneladas y metros cúbicos de ADF generado al año, sus costes de disposición, los Km de CAC potenciales de efectuarse y el indicador de aumento de vida útil de relleno sanitario. Se consideran los años 2007 al 2011 y acumulativo. El indicador de aumento de vida útil de relleno sanitario muestra la importancia que posee valorizar en forma adecuada este residuo ya que para un período de 5 se ahorraría el equivalente de 104 años vida útil de relleno sanitario para una población de 10.000 habitantes.

Conclusiones

Las arenas descartadas de fundición tienen el potencial

Referencias

- Appolloni, O.; Morano, O.; Paredes, A.; Palaverccich, R.; Buechele, O.; Sargioti, M. Asrolog, M.; Almada, M. "Arenas de fundición: su reaprovechamiento como mejorador de suelos en calles y caminos. Congreso Latinoamericano de Fundición COLFUN 2010. Cámara de Industriales Fundidores de la República Argentina. Buenos Aires. Argentina. 28 al 30 de Octubre de 2010
- Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 1993. Ley de Residuos Peligrosos 24.051 Decreto 931/93. Disponible en [http://www.ambiente.gov.ar/? aplicacion=normativa&Id Norma=538& IdSeccion=0](http://www.ambiente.gov.ar/?aplicacion=normativa&Id Norma=538& IdSeccion=0) (Verificado el 23/1/2013).
- Carnin, R.L.P., Folgueras, M.V., Luvizao, R.R., Correia, S.L., da Cunha, C.J., Dungan, R.S. 2012. Use of an integrate approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands. *Termochimica Acta* 543,150-155.
- Consolí et al (1993) *Guideles for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"* SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Bruselas, Bélgica.
- Dalquist, S., Gutowski, T. 2004. Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: sand casting. *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, California, USA.*
- Dayton, E.A., S.D. Whitacre, R.S. Dungan, and N.T. Basta. 2010. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactures soil. *J. Plant Soil* 329: 27-33.
- Deng, A., 2009. Contaminants in waste foundry sands and its leachate. *International Journal Environment and Pollution* 38, 425-443.
- Dungan, R.S., and J.B. Reeves, III. 2005. Pyrolysis of foundry sand resins: A determination of organic products by mass spectrometry. *J. Environ. Sci. Health.* 40:1557-1567.
- Dungan, R.S., Dees, N.H., 2009. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. *Journal of Environmental Management* 90, 539-548.
- Elizalde, S. Incorporación del residuo de arenas de fundición en el proceso productivo del cemento y su influencia en el sistema ambiental. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bueno Aires, FCH - Tesis de Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental. p. 121, 2009.
- Guney, Y., Aydılek, A.H., Demirkan, M.M., 2006. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management* 26, 932-945.

de ser utilizadas como subproductos en concreto asfáltico en caliente. Los antecedentes desde la química ambiental advierten que las ADF son en su mayoría residuos no peligrosos. Desde lo técnico, los CAC elaborados con ADF poseen al menos el mismo comportamiento que los CAC elaborados con arena silicea natural con un incremento en la durabilidad.

Debido a que las ADF son muy diferentes entre si, es necesario previo a su aplicación contar con estudios específicos que evalúen su comportamiento técnico y ambiental.

El análisis de ciclo de vida demuestra que la valorización de ADF como subproducto en CAC genera múltiples beneficios al ambiente:

- reduce el consumo de recursos naturales no renovables
- reduce la generación de gases efecto invernadero
- aumenta la vida útil de rellenos sanitarios
- reduce costos para las fundiciones y plantas asfálticas y abre las posibilidades de un mercado de residuos no explotado
- desde el punto de vista social, transformar un residuo en subproducto es una acción de responsabilidad social empresarial
- desde el punto de vista normativo ambiental, las autoridades de aplicación se aseguran la gestión integral del residuo en concordancia con la Ley de presupuestos mínimos de Gestión Integral de Residuos Industriales y Actividades de Servicios.

Debe considerarse que en la construcción de las diferentes capas estructurales de pavimentos, tanto flexibles como rígidos, se requieren grandes volúmenes de materiales y es una provechosa oportunidad para valorizar significativamente éste subproducto de la industria de fundición.

- Lindsay, B.J., Logan, T.J., 2005. Agricultural reuse of foundry sand. *Journal of Residuals Science & Technology* 2, 3-12
- Marcozzi, R.G.; Miguel, R.E.; Sota, J.D.; Banda Noriega, R.B. 2009. "Comportamiento Técnico – Ambiental de Mezclas Asfálticas en Caliente con la Incorporación de Residuos de Arenas de Diferentes Procesos de Fundición" XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA) Lisboa, Portugal. En actas ISBN 978-972-8692-43-2, v. 2 p. 1481-1490. 2009.
- Miguel, R.E., Ruiz de Galarreta, V.A., Banda Noriega, R.B., 2009. Impacto al recurso hídrico subterráneo por vertedero de residuos de industria de fundición en Tandil, Buenos Aires Argentina: un estudio preliminar. *Boletín Geológico y Minero* 120, 583-594.
- Miguel, R.E.; Ippolito, J.A.; Leytem, A.B.; Porta, A.A.; Banda Noriega, R.B.; Dungan, R.S. 2012. Analysis of total metals in waste molding and core sands from ferrous and non-ferrous foundries. *Journal of Environmental Management* 110, 77-81
- Mroueh, U., Eskila, P., Ylijoki, J.L. 2001. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste Management* 21, 271-277.
- Potti, J.J. (coordinador) 2010. Proyecto Fenix Monografía 1: Sostenibilidad. Disponible en www.proyectofenix.es (Verificado el 23/01/2013)
- Siddique, R., Schutter, G., Noumowe, A., 2009. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* 23, 976-980.
- Sota J.D., Barreda M.L., Monzon J.D., Banda Noriega R.B., Miguel R.E., 2007 "Hormigones de cemento Pórtland con arenas de fundición. *Revista Cemento Hormigón*. N° 900 Año LXXVIII Abril 2007 España.
- U.S. EPA. 2004. Test Method for Evaluation of Solid Waste, Physical/Chemical Methods SW 846. Method 1310B, Extraction Procedure (EP) Toxicity Test Method and Structural Integrity Test. Disponible en <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1310b.pdf> (Verificado el 23/1/2013)

COMISIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DE LA PROVINCIA E BUENOS AIRES



**LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO MULTIDISCIPLINARIO
PARA LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA**

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires



Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica

Calle 52 e/121 y 122. La Plata - Provincia de Buenos Aires - Argentina

Tel.: 54-0221-4831141/44 - Fax: 54-0221-4250471

direccion@lemit.gov.ar

www.lemit.gov.ar