

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

En el presente trabajo se estudia la reología de diversos másticos bituminosos fabricados con diversos aditivos para mezclas semicalientes (ceras y tensioactivos). En primer lugar, se han estudiado las propiedades reológicas de un betún al que se le ha añadido estos aditivos y, posteriormente, se ha analizado el efecto que tienen éstos en las propiedades reológicas de sus correspondientes másticos. Para realizar este estudio se ha empleado el reómetro de corte dinámico (DSR). Se trata de una técnica empleada en la caracterización de ligantes bituminosos, pero raramente utilizada en estudios de másticos bituminosos. Se han analizado barridos de temperatura, barridos de frecuencia, curvas de viscosidad, parámetros SHRP y temperaturas de equiviscosidad de distintos ligantes y másticos semicalientes. Las conclusiones más destacadas del trabajo son que la aditivación con tensioactivos y con ceras reduce la viscosidad de los másticos, permitiendo reducir la temperatura de fabricación y compactación de las mezclas bituminosas. Sin embargo, dicha reducción sobre la viscosidad del mástico no es observada sobre el betún en el caso de los aditivos basados en tensioactivos. La reología se muestra como una herramienta especialmente adecuada para validar el comportamiento de las mezclas semicalientes.

Palabras clave: mezclas semicalientes, reología, másticos, ceras, tensioactivos.

In this paper the rheology of bituminous mastics made with some different “warm additives” (waxes and surfactants) is studied. Firstly we have studied the rheological properties of bitumen where these additives were added to, and subsequently we have analyzed the effect of these additives on the rheological properties of their respective mastic. For this study it has been used the Dynamic Shear Rheometer (DSR). This is a technique used in the characterization of bituminous binders but rarely used in studies of bituminous mastics. Temperature sweeps, frequency sweeps, viscosity curves, SHRP parameters and equiviscosity temperatures of different binders and mastics were analyzed. The main conclusions of the work are that additives such as surfactants and waxes to reduce the viscosity of the mastic, thereby reducing manufacturing and compaction temperatures of asphalt mixtures. However, the reduction of the viscosity of the mastic is not observed on the bitumen in the case of additives based on surfactants. Rheology is shown as a particularly appropriate tool to validate the behavior of warm asphalt mixtures.

Key words: warm mix asphalt, rheology, mastics, waxes, surfactants.

Santiago Gil Redondo sgil.ditecpesa@ferrovial.es
Francisco Javier Suárez Marco fjsuarez.ditecpesa@ferrovial.es
José Javier García Pardenilla jjgarcia.ditecpesa@ferrovial.es
José Miguel Martínez Macedo jmmartinez.ditecpesa@ferrovial.es
Ditecpesa Productos Asfálticos

Alicia Torrejón Atienza alicia.torrej@uah.es
M^a Paz Matía Martín paz.matia@uah.es
Jose Luis Novella Robisco jl.novella@uah.es
Planta Piloto de Química Fina (Universidad de Alcalá)

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

1. Introducción

Las técnicas de fabricación de mezclas bituminosas semicalientes permiten reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra del aglomerado, con los beneficios medioambientales, económicos, prestacionales y de seguridad para los trabajadores que esto conlleva (D'Angelo, et al. 2008). Podemos distinguir varias vías, basadas en distintos fundamentos físico-químicos:

1. Aditivos que modifican la viscosidad del betún: ceras (Gil et al. 2009, Gil et al. 2010). Este grupo de aditivos modifica la reología del betún, de tal modo que, a altas temperaturas (> 100 °C), la viscosidad del ligante resultante disminuye sensiblemente, permitiendo, por lo tanto, una reducción de la temperatura de fabricación del aglomerado. Ver figura 1.

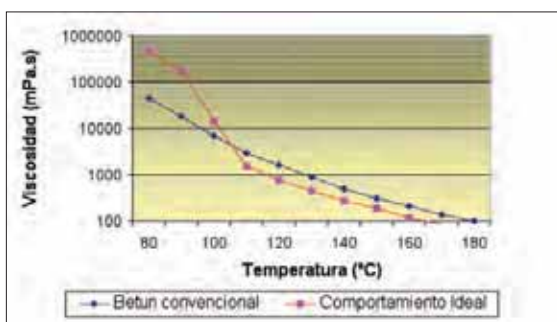


Figura 1. Efecto del empleo de ceras sobre la viscosidad del betún.

2. Aditivos basados en la formulación de tensioactivos que ayudan al buen recubrimiento de los áridos, reduciendo la tensión superficial árido/betún, disminuyendo el ángulo de contacto entre el betún y el árido (Figura 2). Este grupo de

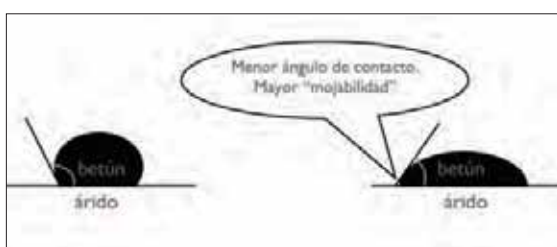


Figura 2. Mejora del ángulo de contacto mediante empleo de tensioactivos.

aditivos químicos puede también actuar como "lubricantes", mejorando la trabajabilidad de la mezcla (Gil et al 2010).

3. Procesos que aumentan la superficie específica del ligante mediante la formación de espuma de betún. Para conseguir esta espuma, se puede incorporar agua y aire a presión, arena húmeda o aditivos tipo zeolita.

En este trabajo se ha analizado la reología de másticos correspondientes a mezclas asfálticas que emplean ceras y tensioactivos como base para reducir la temperatura de fabricación y puesta en obra.

El realizar estudios reológicos sobre másticos da una valiosa información acerca de la trabajabilidad y propiedades mecánicas, que tendrán las mezclas bituminosas fabricadas con éstos (Faheem et al. 2010). Se conoce que las características de los ligantes, los filleres y la relación filler/betún, tienen una influencia significativa sobre la trabajabilidad de la mezcla (Costa et al. 2009). Usualmente se emplea la viscosidad del ligante como método para determinar la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas. Pero este método no tiene validez cuando se estudian ligantes especiales que emplean aditivos, que sin modificar la reología de éste, cambian su comportamiento químico. Por ello, se considera necesario realizar estudios reológicos sobre másticos donde se van a poder reflejar los efectos que estos aditivos especiales tienen sobre la interfaz árido-betún.

2. Trabajo experimental

2.1 DSR (Dynamic Shear Rheometer)

La Reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales. Estudia la relación existente entre las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo y la deformación que éstas producen, además de cómo y cuánto recuperan su estado inicial después de la aplicación de esta carga.

El estudio reológico del betún es importante, porque, a pesar de que representa una parte relativamente pequeña en una mezcla asfáltica, condiciona en gran medida la mayoría de las propiedades mecánicas y reológicas de las mismas y es el responsable del complejo comportamiento de ella. En este trabajo, como se ha comentado anteriormente, además de estudiar la reología de los betunes se va a estudiar la reolo-

Tabla 1. Granulometría de la arena empleada

Tamices (mm)	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Peso (g)	10,1	230,3	485,5	619,2	707,9	747,8	784,9
Tolerancia	100-80	96-62	84-40	60-18	30-6	18-0	15-0
% Pasa	98,9	74,6	46,4	31,6	21,8	17,4	13,3

gía de los másticos fabricados con estos, lo cual nos acercará aún más a las propiedades de la mezcla asfáltica final.

Según diversos autores (Lu et al. 2002), los ensayos empíricos, combinados con medidas de viscosidad, fallan a la hora de caracterizar las prestaciones de los betunes. Las tradicionales medidas, como índice de penetración o punto de reblandecimiento, no pueden describir perfectamente las propiedades visco-elásticas necesarias para relacionar las propiedades físicas del ligante y su comportamiento en servicio. Los ensayos de viscosidad, aun siendo uno de los ensayos empíricos fundamentales para la determinación del comportamiento reológico de betunes, no informan sobre el comportamiento de éste con el tiempo. Los principales parámetros visco-elásticos que se obtienen de un equipo DSR son el módulo complejo, $|G^*|$, y el ángulo de fase, δ .

$|G^*|$ se define como la proporción existente entre la máxima deformación y el máximo esfuerzo, y es una medida de la resistencia total del betún a la deformación cuando el betún es sometido a esfuerzos de cizalla. El ángulo de desfase, δ , es una medida del grado de visco-elasticidad del material. En la

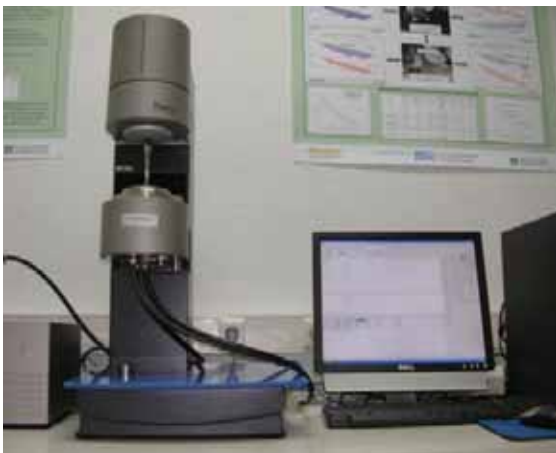


Figura 3. Reómetro de corte dinámico (DSR).

figura 3 se muestra la fotografía de un reómetro utilizado en esta fase del trabajo experimental.

2.2 Materiales empleados

A continuación se describen los ligantes y aditivos/modificadores empleados:

- B 50/70: se trata de un ligante convencional. Este ligante se ha tomado como referencia y sobre él se han adicionado los distintos aditivos que se describen a continuación.
- Cera F-T: se trata de una cera comercial, que se obtiene por síntesis a partir de gas natural y agua (Síntesis Fischer-Tropsch).
- Aditivo 1: se trata de una cera diseñada y desarrollada en la actividad 7 del Proyecto Fénix, con unas prestaciones superiores a las comerciales, ya que se consigue disminuir la viscosidad del ligante en mayor medida.
- Tensioactivo 1: se trata un tensioactivo comercial empleado en la fabricación de mezclas semicalientes.
- Tensioactivo 2: se trata otro tensioactivo comercial empleado en la fabricación de mezclas semicalientes.

A continuación se muestran algunos ensayos realizados sobre el árido empleado, cuya naturaleza es caliza.

UNE-EN 933-1. Granulometría (ver tabla 1 y figura 4):

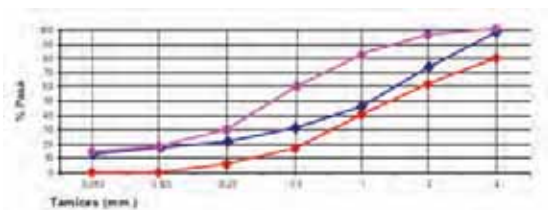


Figura 4. Curva granulométrica de la arena empleada.

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

EN 1097-6. Determinación las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido fino (ver tabla 2):

Tabla 2. Densidades y absorción de agua de la arenas utilizadas

Densidad aparente de partículas (Mg/m ³)	2,839
Densidad de partículas tras secado en estufa (Mg/m ³)	2,813
Densidad de partículas saturadas con la superficie seca (Mg/m ³)	2,822
Absorción de agua (% masa seca)	0,33

UNE-EN 933-8. Determinación del equivalente de arena:

Este árido es tamizado por el tamiz con luz 0,063 mm para separar el filler que se ha empleado en la fabricación de los másticos ensayados (a lo largo de la publicación se utilizará el término anglosajón *filler* en lugar del término "polvo mineral" que se describe en la normativa española de materiales para carreteras).

Un mástico bituminoso no es más que el producto resultante de la mezcla de un filler con un betún. El mástico es el responsable de dotar a una mezcla asfáltica de la cohesión necesaria para mantener unidas las partículas de árido.

En el presente trabajo sólo se ha estudiado este filler en concreto. Si se quisiera ampliar el estudio a otros fillers distintos y comparar los resultados obtenidos, sería necesario evaluar la superficie específica de estos fillers, por ejemplo, evaluando la distribución de tamaños de éste. La proporción realmente importante entre el filler y el betún que forma un mástico no es su proporción en peso, sino su relación: [superficie específica del filler / masa de betún], lo cual nos indicaría qué espesor de película de betún recubre el filler, y así trabajar siempre con espesores comparables.

2.3 Metodología del ensayo

La formulación empleada para todos los másticos estudiados ha sido de un 70% filler + un 30% de ligante (% en peso). Las proporciones de los productos comerciales empleados en las mezclas son las indicadas por el fabricante. Para el caso del Aditivo 1, se realizó un estudio previo para determinar la concentración óptima.

1. Betún 50/70
2. Betún 50/70 + Cera F-T
3. Betún 50/70 + Aditivo 1
4. Betún 50/70 + Tensioactivo 1
5. Betún 50/70 + Tensioactivo 2
6. Mástico 70% Filler + 30% Betún 50/70
7. Mástico 70% Filler + 30% Betún con Tensioactivo 1
8. Mástico 70% Filler + 30% Betún con Tensioactivo 2
9. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Cera F-T
10. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Cera F-T + Tensioactivo 1
11. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Cera F-T + Tensioactivo 2
12. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Aditivo 1
13. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Aditivo 1 + Tensioactivo 1
14. Mástico 70% Filler + 30% Betún modificado con Aditivo 1 + Tensioactivo 2

La fabricación de estos másticos se ha realizado de la siguiente manera:

En un recipiente metálico se pesan 70 g del filler a emplear (70%) y se guarda en una estufa a 165 °C. Por otro lado, en otro recipiente con betún caliente se adiciona la cantidad deseada de Cera F-T o Aditivo 1 y/o tensioactivo 1 ó 2. La mezcla se mantiene a 140 °C durante media hora a 120.000 Hz con un agitador de hélice, hasta conseguir total dispersión del aditivo y homogenización de la mezcla. De esta mezcla, 30 g (30%) se vierten sobre el filler ya caliente y se agita sobre placa calefactora con una varilla de vidrio o espátula, hasta conseguir un mástico homogéneo. Esta mezcla se vierte sobre recipientes de aluminio previamente etiquetados.

Para el estudio por reología, la metodología seguida en la preparación de las muestras es la que se indica a continuación:

Los recipientes de aluminio que contienen las mezclas anteriormente preparadas se meten en la estufa a 165 °C. El contenido en caliente se vierte sobre papel antiadherente, como, por ejemplo, papel Krafft, en el cual se han colocado unas guías de un grosor de 2 mm para contener la muestra. Una vez vertido el mástico caliente sobre dicho papel, se coloca otro papel encima y unas planchas metálicas y se presiona con tres mordazas de carpintero durante un mínimo de 2 horas a temperatura ambiente.

Pasado este tiempo, el mástico queda como una lámina de color negro de 2 mm de espesor. Para el ensayo en el reómetro se emplean muestras que son troqueladas con un troquel de 25 mm de diámetro. El disco obtenido se dispone en el equipo a temperatura ambiente. Posteriormente, se lleva la temperatura hasta un valor en la cual el plato superior del equipo es capaz de presionar la muestra hasta un espesor o separación entre platos (gap) de 1.05 mm. Se retira el exceso de muestra que sobresale de los platos con una espátula caliente, una vez alcanzado 1.05 mm de separación entre platos. Se programa la temperatura hasta la temperatura de ensayo y se ajusta la separación entre platos a 1.00 mm, observándose siempre una protuberancia en la periferia de la geometría. Una vez ajustada la separación entre platos y la temperatura de ensayo y habiendo retirado el exceso de muestra, se procede a realizar la medida. Se aconseja atemperar la muestra durante al menos 10 minutos a la temperatura de ensayo antes de realizar la medida reológica.

3. Resultados

3.1 Estudios sobre ligantes

A continuación se exponen los ensayos realizados para mezclas de betún con los aditivos empleados o con lo tensioactivos. Los ensayos realizados en el reómetro, para el estudio de los parámetros tales como el módulo complejo, módulo de almacenamiento, módulo de pérdidas y el ángulo de fase, se han realizado dentro de un rango de temperaturas y frecuencias con el objeto de tener una caracterización reológica completa dentro de la región de visco elasticidad lineal (LVE). Dentro de esta zona, la relación entre la cizalla generada y la deformación conseguida es influenciada por la temperatura y el tiempo, pero no por la magnitud de la cizalla o la deformación.

3.1.1 Barrido de temperatura

En la figura 5 se muestra una comparativa de un barrido de temperatura a una frecuencia fija de 1 rad/s (0.16 Hz) para las mezclas de betún con cera F-T, con el Aditivo 1 y con los Tensioactivos 1 y 2; observando que la mezcla de betún con los tensioactivos provoca una pequeña bajada en los valores del módulo complejo, $[G^*]$, y un aumento del ángulo de fa-

se, δ , indicando una menor rigidez que el betún base de referencia. En el barrido para las mezclas con la cera F-T y el Aditivo 1, el efecto es el contrario, un aumento de módulo, indicativo de una mayor rigidez de la mezcla y valores de δ menores, indicativo de una mayor elasticidad. (Aunque la unidad rad/s no es propiamente dicha una unidad de frecuencia, sino de velocidad angular, es muy común encontrar en la bibliografía y en los datos generados por los reómetros la expresión de barrido de frecuencia en dicha unidad en lugar de Hz, que es la unidad propia de frecuencia en el sistema internacional de medidas).

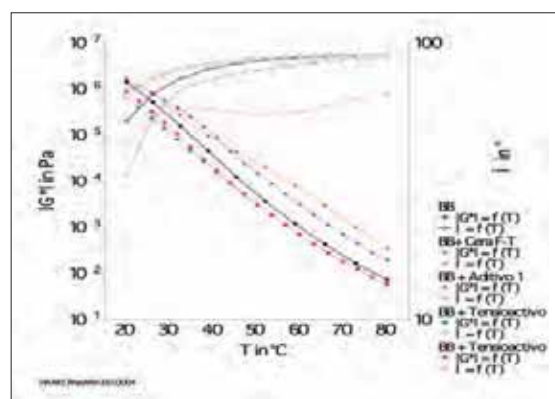


Figura 5. Barrido de temperatura a una frecuencia de 1 rad/s (0,16 Hz).

Para un barrido de temperatura a una frecuencia fija de 10 rad/s (figura 6), la disminución de los valores de $[G^*]$ en el caso de mezclas con tensioactivos no es tan marcada como a 1 rad/s, ya que los valores de módulo son muy similares a

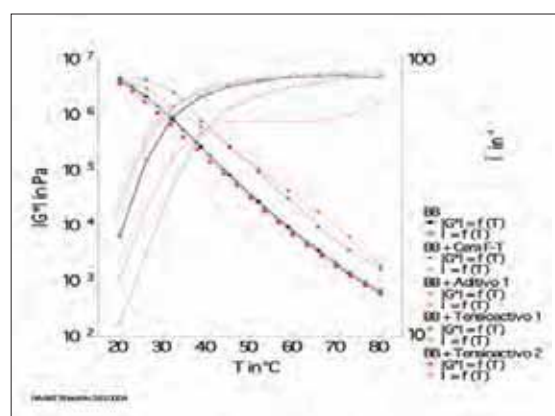


Figura 6. Barrido de temperatura a una frecuencia de 10 rad/s (1,6 Hz).

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

un betún base de referencia. Si embargo, se sigue poniendo de manifiesto que los betunes modificados con ceras presentan un comportamiento más rígido y elástico que el betún base de partida (BB).

3.1.2 Barrido de frecuencia

En la figura 7, las mezclas que contienen los tensioactivos provocan una disminución de la rigidez a lo largo del barrido de frecuencia y a la temperatura de 50 °C, mientras que las mezclas que contienen la cera F-T o el Aditivo 1, el efecto es contrario, como ocurría en los barridos de temperatura a una frecuencia fija.

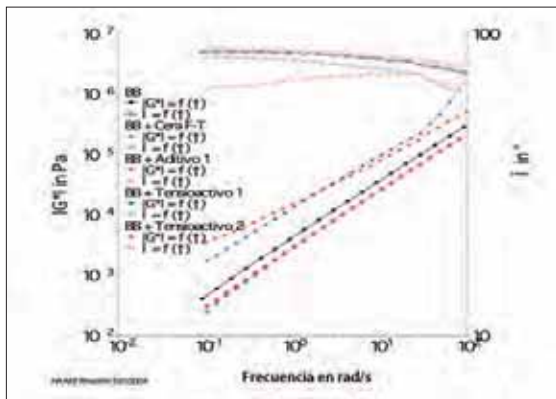


Figura 7. Barrido de frecuencia a 50°C.

En el caso del barrido a 70 °C (figura 8), los valores de módulo para las mezclas con tensioactivos son muy similares a los del betún base de partida, en el rango de frecuencia medido. Para las mezclas que contienen las ceras, los valores de módulo

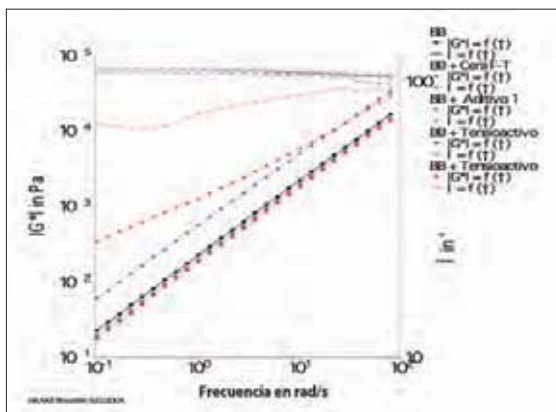


Figura 8. Barrido de frecuencia a 70°C.

complejo son mayores, indicando un aumento de la rigidez del material, siendo los mayores valores a bajas frecuencias para el betún con el Aditivo 1, el cual posee la mayor elasticidad.

3.1.3 Variación de la viscosidad con la temperatura

Si se observa la curva de viscosidad, figura 9, cuando la velocidad de cizalla es de 1 s⁻¹, donde se representa la viscosidad del betún base de partida (B35/50) y la de los betunes que contiene ceras, el efecto que se obtiene en la viscosidad con la adición de la Cera F-T es menos pronunciado que el conseguido con la adición del Aditivo 1. Para este último aditivo se aprecia una caída muy brusca de la viscosidad a partir de los 95°C.

La adición de los tensioactivos 1 o 2 al betún no afecta a la viscosidad del betún de partida como puede observarse en la figura 10.

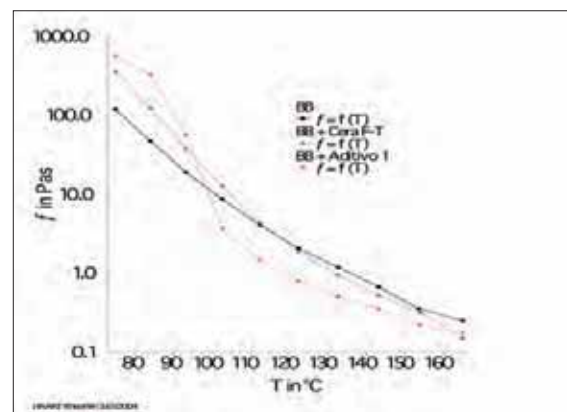


Figura 9. Barrido de viscosidad frente a la temperatura a una velocidad de cizalla de 1s-1.

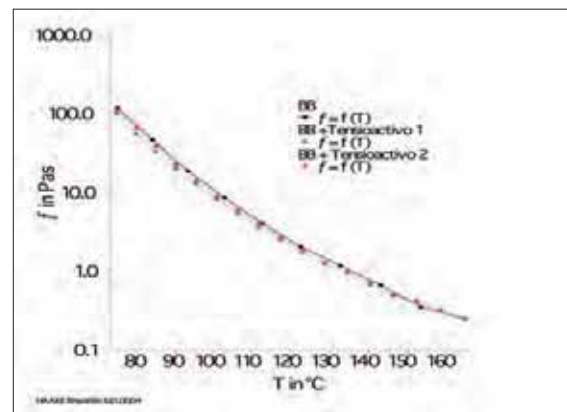


Figura 10. Barrido de viscosidad frente a la temperatura a una velocidad de cizalla de 1s-1.

3.1.4 Efecto reológicos a media y alta temperatura

Desde el año 2002 se vienen desarrollando esfuerzos para tratar de normalizar la preparación de muestras de betún y sus modificaciones y la medida del comportamiento de las mismas en servicio. Así, el proyecto BiTSpec y el Comité Técnico de los ligantes bituminosos (CEN/TC 336) ha preparado un sistema de especificaciones para establecer la metodología y ensayos en la caracterización de ligantes bituminosos frente a las deformaciones plásticas, mediante la medida de la Temperatura de Equiviscosidad EVT, basada en la medida de la LSV, o temperatura a la cual un betún o ligante bituminoso presenta un valor definido de la viscosidad de corte a baja velocidad de deformación, para un valor fijado de tensión o velocidad de deformación de corte, siendo, por tanto, un indicador de su susceptibilidad a las deformaciones plásticas, obtenida en ensayos DSR a muy baja frecuencia. La obtención de estos valores se encuentra descrita por A. Franesqui García (Franesqui, A. et al. 2007).

La medida de la resistencia a deformaciones plásticas de los betunes, la temperatura máxima a la cual esto ocurre y la viscosidad a velocidad de cizalla cero o ZVS, Zero Shear Viscosity) parecen ser buenos indicadores para cuantificar la resistencia a la formación de huella por rodera o "rutting", pero su medida es difícil de realizar.

Por otro lado, el parámetro más utilizado para calcular si un betún posee resistencia óptima para evitar la formación de roderas es el parámetro SHRP de $[G^*]/\text{sen}\delta$ a 60 °C, el cual, debe ser superior a 1 kPa.

Un cálculo alternativo es la obtención de la temperatura máxima a la cual el anterior parámetro SHRP es superior

a 1 kPa. Relacionada con este valor se encuentra la temperatura de equiviscosidad EVT, que se relaciona con una determinada LSV. Otros autores (Edwards, Y. et. 2007) prefieren evaluar esta propiedad por medio del cálculo de la pendiente en función de la variación logarítmica de la variación del módulo complejo entre las temperaturas de +25 y +60 °C. Dicha pendiente es calculada en ensayos por DSR en barridos de frecuencia a 10 rad/s (1,6 Hz). La pendiente ST_1-T_2 viene expresada por $[(\log G^*(T_2)) - (\log G^*(T_1))]/(T_2 - T_1)$, donde $G^*(T_2)$ y $G^*(T_1)$ son los módulos complejos a las temperaturas T_2 y T_1 , respectivamente. El mayor valor de esta pendiente indica una mayor sensibilidad a la temperatura.

Si nos fijamos en la tabla 3, se puede concluir que el empleo de ceras nos proporciona mayores valores de las temperaturas calculadas EVT 1 y 2, mientras que, en el caso de los tensioactivos, estos valores apenas varían y, por tanto, el efecto de huella por rodera se da a menores temperaturas. Para el caso de los valores de temperatura SHRP, los mayores valores vienen dados, de nuevo, con el empleo de las ceras. Es decir, los betunes que contienen ceras presentan un mejor comportamiento frente a las deformaciones plásticas, pudiendo ser aplicados sobre firmes que van a soportar mayores temperaturas.

3.2 Estudios sobre másticos

A continuación se exponen los ensayos reológicos realizados para másticos fabricados con los ligantes estudiados en el punto anterior.

Tabla 3. Parámetros reológicos de los ligantes aditivados – efectos en las roderas

Tipo de ligantes	$[G^*]/\text{sen}\delta$ a 60°C (Pa)	$\max T^*$, $[G^*]/\text{sen}\delta =$ 1 kPa (°C)	EVT 1 (°C) 0,1 rad/s	EVT 2 (°C) 0,00063 rad/s	S25-60 $\times 10^{-2}$	G^* (25°C) $\times 10^5$	G^* (60°C) $\times 10^2$
BB	7.016	71,3	52,8	53,2	-7,41	2,14	7,23
BB + Aditivo 1	29.068	82,1	73,6	80,7	-6,13	7,92	79,34
BB + Cera F-T	26.295	81	65	65,9	-7,36	9,54	37,72
BB + Tensioactivo 1	7.863	73	56	56,6	-7,43	2,3	6,81
BB + Tensioactivo 2	8.413	73,2	55,3	55,6	-7,84	3,18	6,87

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

3.2.1 Barrido de temperatura:

Si se analiza el barrido de temperatura a una frecuencia de 1rad/s (figura 11), se puede observar que los másticos que contienen cera tienen un mayor módulo complejo $[G^*]$ y un menor ángulo δ . Esto quiere decir que se trata de un material más rígido y elástico que el mástico de referencia, que está fabricado con betún B50/70. Sin embargo, para los másticos que contienen tensioactivos, el valor del módulo complejo $[G^*]$ disminuye y el ángulo δ aumenta si lo comparamos con el mástico de referencia. Luego estos másticos van a ser menos rígidos y elásticos que el mástico que no contiene aditivos.

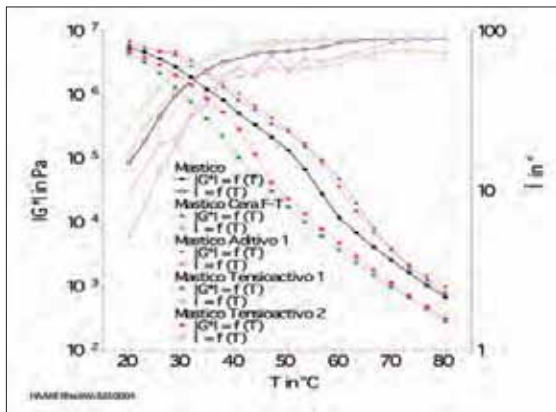


Figura 11. Barrido de temperatura a una frecuencia de 1 rad/s (0,16 Hz) para los másticos.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos anteriormente con los ligantes (figura 5), se puede observar que guardan una correlación con los obtenidos en los másticos. Si bien es cierto que, en el caso de los másticos, se acentúa la bajada del valor del módulo complejo para los casos en los que se emplean tensioactivos.

En el caso de repetir el barrido a una frecuencia de 10 rad/s, (figura 12), se observa que, a medida que aumenta la temperatura, la pendiente de las curvas se hace más pronunciada que cuando la frecuencia es de 1 rad/s. Se mantiene que, en el caso de másticos con tensioactivos, los valores de módulo complejo son menores y, por tanto, menor rigidez del mástico.

3.2.2 Barrido de frecuencia

En el barrido de frecuencia a 50 °C (figura 13), el mástico que contiene el tensioactivo 1 proporciona los menores valores

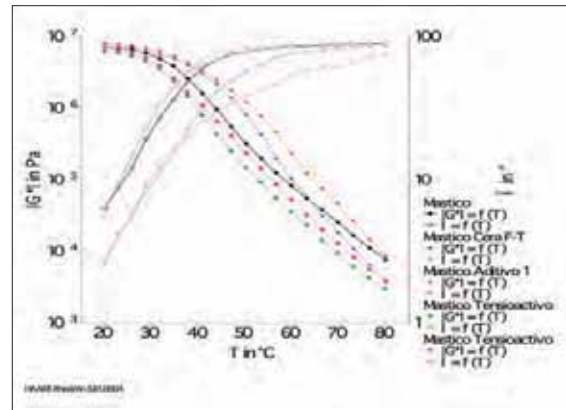


Figura 12. Barrido de temperatura a una frecuencia de 10 rad/s para los másticos.

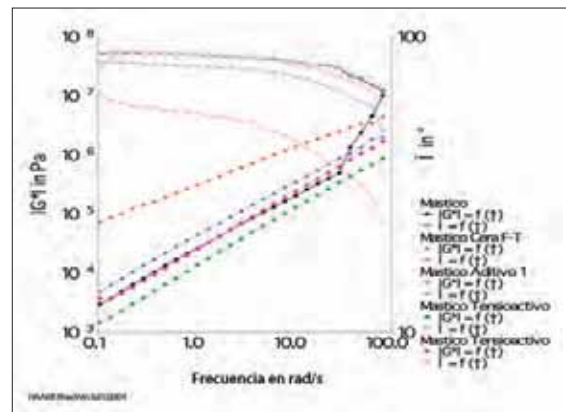


Figura 13. Barrido de frecuencia a 50°C de los másticos con las ceras y tensioactivos empleados.

de módulo en todo el rango, mientras que, para el caso del Tensioactivo 2, los valores de módulo son muy similares al mástico de referencia. Para el Aditivo 1, se observan los mayores valores de módulo y menores valores de ángulo, lo que indica una mayor rigidez y elasticidad.

Si nuevamente estos resultados se comparan con los que se obtuvieron en los estudios de los ligantes (figura 7), se puede observar cómo el aditivo 1 rigidiza más el mástico de lo que lo hacía al betún. El tensioactivo 2 se comporta en el mástico también algo más rígido que lo que ocurría cuando se estudió el ligante que contenía este tensioactivo, obteniendo valores próximos a los del mástico de referencia.

Cuando se realiza el barrido de frecuencia a 70 °C (figura 14), se observa que los valores de módulo para los másticos con los ligantes son más similares a los del mástico en general, a valores de frecuencia altos. Cuando la frecuencia es baja, en el caso del mástico con el Aditivo 1, se observan unos va-

lores de módulo mayores que en el resto de másticos, indicativo de mayor rigidez, y por tanto, menor variación del comportamiento viscoelástico en el rango de frecuencia estudiado debido a una curva menos pronunciada. Atendiendo a los valores del ángulo de fase para esta mezcla, se observa que este mástico posee los valores más bajos de δ , y por tanto, posee mayor elasticidad. Para másticos con tensioactivos, se ve que sus valores de módulo son menores y por tanto posee menor rigidez.

3.2.3 Barrido de viscosidad

La figura 15 muestra las curvas de viscosidad para estos másticos. Se puede observar cómo todos los másticos que contienen tanto ceras como tensioactivos reducen la vis-

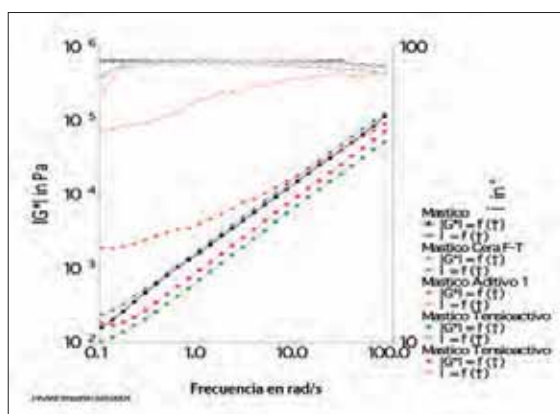


Figura 14. Barrido de Frecuencia a 70°C de mástico con las ceras y tensioactivos empleados.

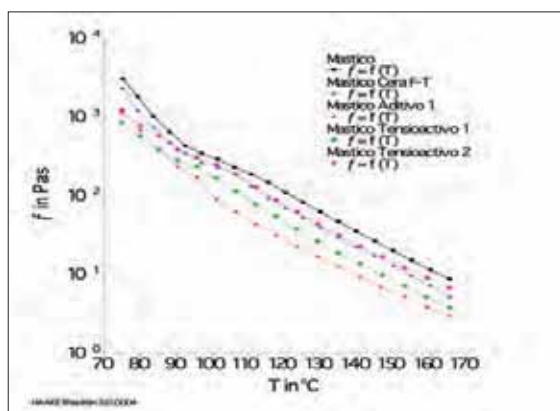


Figura 15. Barrido de viscosidad frente a la temperatura a una velocidad de cizalla de 1 s-1 para los másticos con las ceras y tensioactivos empleados.

cosidad en todo el rango de temperatura cuando lo comparamos con el mástico de referencia. Por tanto, se puede concluir que la adición de estas sustancias, pese a tratarse de compuesto con naturalezas distintas y tecnologías diferenciadas, consiguen reducir la viscosidad del mástico a temperaturas de fabricación y compactación del aglomerado, y por lo tanto, reducir las temperaturas de empleo de éstos.

En estos másticos se puede comparar la eficacia de las distintas técnicas semicalientes (ceras vs. tensioactivos), cosa que no se podía hacer cuando se analizaban los ligantes de partida. De hecho, se puede afirmar que el compuesto que reduce en mayor medida la viscosidad del mástico es la cera: aditivo 1, desarrollada en el proyecto Fénix, superando al resto de sustancias comerciales estudiadas.

3.2.4 Estudios reológicos a media y alta temperatura

Si nos fijamos en los parámetros reológicos que afectan a la generación de roderas, en la tabla 4 se puede observar que el uso de los tensioactivos provoca menores valores en las temperaturas de equiviscosidad EVT 1 y 2. Ésto no ocurriría cuando se analizaron estos mismos parámetros en los ligantes (tabla 3). Es decir, estos tensioactivos hacen que el mástico sea más susceptible a deformaciones plásticas. Todo lo contrario ocurre al añadir las ceras (cera F-T y aditivo 1), ya que se obtienen valores de EVT mayores que para el mástico de referencia; es decir, pueden ser empleados en carreteras que van a soportar una mayor temperatura.

Además, el uso de la Cera F-T y del Aditivo 1 originan menores valores de la pendiente S25-60 (en valor absoluto), lo que indica una menor susceptibilidad térmica que el mástico de referencia y bastante menor que los másticos que contienen tensioactivos, que son los más susceptibles térmicamente hablando. Ésto quiere decir que sus módulos complejos cambian en mayor medida cuando la temperatura a la que se encuentran varía.

3.3 Estudios sobre másticos – combinación de tecnologías

En esta parte del trabajo se ha tratado de evaluar si la combinación de los diversos procesos físico-químicos de los aditivos tiene un efecto positivo sobre el mástico y permite re-

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

Tabla 4. Parámetros reológicos de los másticos aditivados – efectos en las roderas

Mezcla	$[G^*]/\text{sen}\delta$ a 60°C (Pa)	$\max T^*$, $[G^*]/\text{sen}\delta =$ 1 kPa (°C)	EVT 1 (°C) 0,1 rad/s	EVT 2 (°C) 0,00063 rad/s	S25-60 $\times 10^{-2}$	G^* (25°C) $\times 10^5$	G^* (60°C) $\times 10^2$
Mástico	80.511	87,2	71,9	74,4	-7,32	36,33	117,3
Mástico + Aditivo 1	122.382	89,2	75,12	80,47	-6,23	47,57	361,6
Mástico + Cera F-T	242.909	89,3	80,9	84,9	-5,85	47,44	481,9
Mástico + Tensioactivo 1	43.272	80,8	65	66,5	-8,12	21,24	36,75
Mástico + Tensioactivo 2	48.707	81	66,5	68,3	-8,08	22,71	40,13

ducir aún más las temperaturas de trabajo durante la fabricación y puesta en obra del aglomerado. Para ello se han estudiado másticos comparando un mástico que emplea Cera F-T con el mismo mástico que también contiene los tensioactivos 1 ó 2. De la misma forma, se realiza la comparativa de un mástico que emplea el Aditivo 1 con el mismo mástico que también contiene los tensioactivos 1 ó 2.

En estos casos sólo vamos a reflejar los resultados obtenidos cuando se analizan las curvas de la viscosidad frente a la temperatura.

3.3.1 Mástico que emplea la cera F-T + tensioactivos

Los másticos estudiados en esta parte del trabajo son:

1. Mástico 70% filler + 30% betún
2. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con cera F-T
3. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con cera F-T + tensioactivo 1
4. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con cera F-T + tensioactivo 2

Los estudios de viscosidad para estos másticos están representados en la figura 16:

En esta figura se observa que todos los másticos modificados con la cera F-T y con o sin tensioactivos poseen menores valores de viscosidad con respecto al mástico de referencia. Además, la combinación de la cera con los distintos tensioactivos disminuye algo la viscosidad del mástico. Lue-

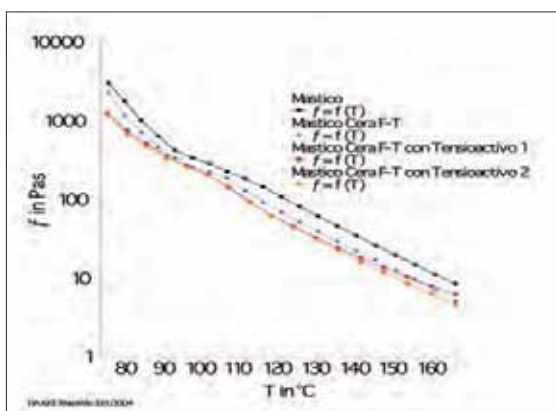


Figura 16. Barrido de viscosidad frente a la temperatura a una velocidad cizalla de 1 s-1 para másticos que combinan la cera F-T con tensioactivos.

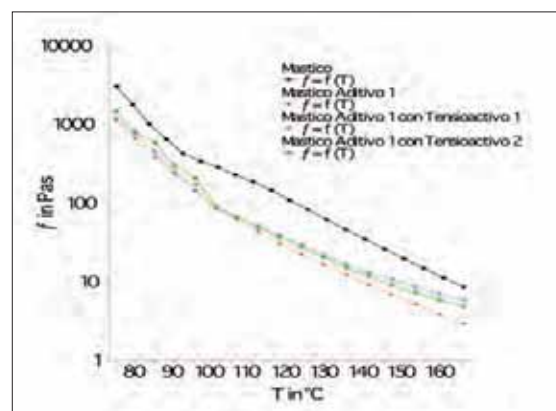


Figura 17. Barrido de viscosidad frente a la temperatura a una velocidad cizalla de 1 s-1 para másticos que combinan la cera Aditivo 1 con tensioactivos.

go parece que la combinación de tecnologías puede reducir las temperaturas de trabajo de estas mezclas, aunque no de una manera significativa.

3.3.2 Mástico que emplea la cera aditivo 1 + tensioactivos

Los másticos comparados en esta parte del trabajo son:

1. Mástico 70% filler + 30% betún
2. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con aditivo 1
3. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con aditivo 1 + tensioactivo 1
4. Mástico 70% filler + 30% betún modificado con aditivo 1 + tensioactivo 2

En este caso, la combinación de esta cera con los distintos tensioactivos no mejora (disminuye) la viscosidad del mástico que sólo contiene la cera. No tendría sentido, a la vista de estos resultados, combinar esta cera con estos tensioactivos para conseguir reducir las temperaturas de trabajo del aglomerado.

4. Conclusiones

- Los resultados obtenidos en los estudios reológicos realizados sobre los betunes modificados con ceras (cera F-T y aditivo 1), se correlacionan con los resultados que luego se han obtenido para los másticos fabricados con ellos. Ésto es debido a que las ceras modifican la reología del betún, y por ende, éste modifica la del mástico correspondiente.
- Por el contrario, cuando se estudia la reología de los másticos fabricados con tensioactivos, estos resultados no se correlacionan con los que se obtenían con los ligantes de referencia. Ésto es debido a que los tensioactivos no modifican la reología del betún, sino su química, lo que va a afectar a la interfaz áridi-betún, y por lo tanto a la reología de sus másticos.
- Para todas la tecnologías semicalientes estudiadas (ceras y tensioactivos) se ha puesto de manifiesto su capacidad para reducir la viscosidad del mástico y, por lo tanto, las temperaturas de fabricación de los aglomerados fabricados con éstos.

- El estudio reológico de másticos es una herramienta útil para analizar el efecto que distintos aditivos químicos tendrán sobre las mezclas asfálticas.
- El estudio reológico de másticos permite comparar las propiedades de las mezclas que emplean distintas tecnologías de mezclas asfálticas semicalientes.
- A la vista de los resultados, la cera: aditivo 1, desarrollada en la actividad 7 el Proyecto Fénix, es la que tecnología que permite reducir en una mayor medida las temperaturas de fabricación del aglomerado, debido a que es la que más reduce la viscosidad del mástico.
- Las ceras (cera F-T y aditivo 1) aumentan la rigidez y elasticidad de los másticos. Se obtienen mayores valores de $[G^*]$ y menores valores del ángulo δ , permitiendo utilizar estos materiales en carreteras que van a soportar una mayor temperatura ambiental. Además da lugar a mezclas con una susceptibilidad térmica menor.
- Por el contrario, los tensioactivos disminuyen la rigidez y elasticidad de los másticos. Se obtienen menores valores de $[G^*]$ y mayores valores del ángulo δ . Luego pueden dar lugar a mezclas más susceptibles a deformaciones plásticas.
- La combinación de tecnologías semicalientes (ceras + tensioactivos) sólo es efectiva cuando se añade un tensioactivo a la cera F-T, aunque su efecto no es significativo.

5. Referencias

- Costa, A., Loma, J., Moreno E. 2009. *Influencia de las características del betún y los másticos en la determinación de las temperaturas de fabricación y trabajo de las mezclas bituminosas*. XV Cila
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, H., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. 2008. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y., Isacsson, U. 2007. *Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220- high and medium temperature performance*. Construction and Building Materials, Vol 21, pp. 1899-1908.
- Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S.-H, and Al-Qadi, I. 2010. *Evaluation of Rigden Fractional Voids Test Method and the Relation to Mastic Viscosity*. Journal of

Influencia de diversos aditivos para mezclas bituminosas semicalientes en las características reológicas del betún y del mástico

- the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 79, pp. 1–34.
- Franesqui, M.A., Guiliani, F., 2007. *Nuevas especificaciones europeas para la caracterización de betunes asfálticos frente a las deformaciones plásticas*. Revista Carreteras. Vol. 152, pp. 62-74.
 - Gil, S., Amor, J.I., Felipo, J., Costa, A., Cortés, C., Páez, A., F. Valor, F., Potti, J.J. 2009. *Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas*. IV Jornada Nacional de Asefma.
 - Gil, S., González, J.A., Sánchez, E. 2010. *Estudio del ángulo de contacto de betunes y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas*. V Jornada de Asefma.
 - Gil, S., Suárez, F.J., García, J.J., Martínez, J.M., M.P. Matía, M.P., Torrejón, A., Novella, J.L. 2010. *Estudio mediante las técnicas DSR y DSC/MDSC de ligantes modificados con ceras sometidos a envejecimiento RTFOT y PAV*. V Jornada de Asefma.
 - Lu, X; Isacsson, U. 2002. *Construction and Building Materials*. 16, 15-22
- (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

6. Agradecimientos

El presente trabajo pertenece a una de las líneas de investigación llevadas a cabo en el Proyecto Fénix: la Actividad 7 (Mezclas Semicalientes). En esta actividad participan las empresas Ditecpesa, Pavasal, Elsan, Serviá Cantó, CIESM y Repsol; y las universidades: Universidad de Alcalá, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Cantabria y Universidad de Huelva.

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM), Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditecpesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal, Repsol YPF, Sacyr, Serviá Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC