

# Estudio del ángulo de contacto de betunes aditivados y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas



Study of contact angle in admixed bitumen and its effect on various mechanical properties of asphalt mixes

Santiago GIL REDONDO

Jefe de Laboratorio (Calidad, I+D+I). Ditecpesa, S.A.  
Jefe de la actividad 7 del Proyecto Fenix  
(28806 Alcalá de Henares)

Juan A. GONZÁLEZ LEÓN

Ingeniero de Investigación y Desarrollo  
Centro de Investigación de Rhône-Alpes, ARKEMA Francia  
(Pierre-Bénite 69493, Francia)

Elsa SÁNCHEZ ALONSO

Universidad de Cantabria (Giteco)  
(39005 Santander)

## RESUMEN

La reducción de las temperaturas de trabajo del aglomerado tiene como consecuencia una disminución de la energía consumida en el proceso y por lo tanto la reducción de las emisiones generadas. Por lo que son mezclas de elevado interés siempre y cuando no se vean afectadas las prestaciones del firme construido.

Uno de los mecanismos empleados para reducir estas temperaturas es el empleo de aditivos tipo tensoactivos. Estos aditivos minimizan la tensión superficial árido-betún y por lo tanto la energía necesaria para formar ésta interfaz. Una forma de evaluar la tensión superficial de un líquido es midiendo el ángulo de contacto que se forma entre la superficie sólida y el líquido.

En este estudio se ha tratado de relacionar medidas de ángulos de contacto con posteriores ensayos sobre mezclas asfálticas. Para ello se han estudiado betunes a los que se han adicionado distintos aditivos que afectan a la tensión superficial del betún.

**Palabras clave:** Betún, Ligante, Ángulo de contacto, Tensión superficial, Tensoactivo, Energía de compactación, Mezcla semicaliente, Mezcla bituminosa, Mezcla asfáltica.

## ABSTRACT

Reducing the asphalt mix working temperatures leads to a reduction on the energy consumption needed to produce it and a decrease on the generated polluting emission. These "warm mix asphalts" are thus very attractive for the road industry, if the final pavement performance is comparable to that of a regular hot mix asphalt.

One of the technologies used to produce warm mix asphalts is the use of liquid surfactant-like additives. These additives reduce the surface tension between the mineral aggregate and the bitumen, promoting the formation of such interphase and the proper coverage of the aggregates.

A technique used to evaluate the surface tension of a liquid is measuring the contact angle formed on a given substrate. In this work, a correlation between measured bitumen contact angles and asphalt mix tests is attempted.

**Key words:** Bitumen, Binder, Contact angle, Surface tension, Surfactant, Compaction energy, Warm mix asphalt, Asphalt mix.

El presente trabajo pertenece a una de las líneas de investigación llevadas a cabo en la actividad 7 del Proyecto FENIX en la que se ha contado con la colaboración de CECA (Grupo ARKEMA) para la realización de las medidas del ángulo de contacto.

La actividad 7 del proyecto Fenix se centra en el estudio de las mezclas *semicalientes* (WMA, "Warm Mix Asphalt"), que se denominan a aquellas mezclas asfálticas que se trabajan a temperaturas inferiores que las mezclas en caliente convencionales (HMA, "Hot Mix Asphalt") y emplean betún asfáltico como ligante. Las mezclas *templadas* son aquellas que se fabrican con emulsiones bituminosas en planta asfáltica a unas temperaturas superiores a las de las mezclas en frío (70-95°C)<sup>(1)</sup>.

La Figura 1 muestra un esquema con los distintos grupos de mezclas que podemos encontrar.

Si nos centramos en la mezclas semicalientes podemos distinguir varias tecnologías basadas en distintos fundamentos físicos para conseguir esta reducción de temperatura de empleo:

- Aditivos que modifican la viscosidad del betún, ceras<sup>(2)</sup>. 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.

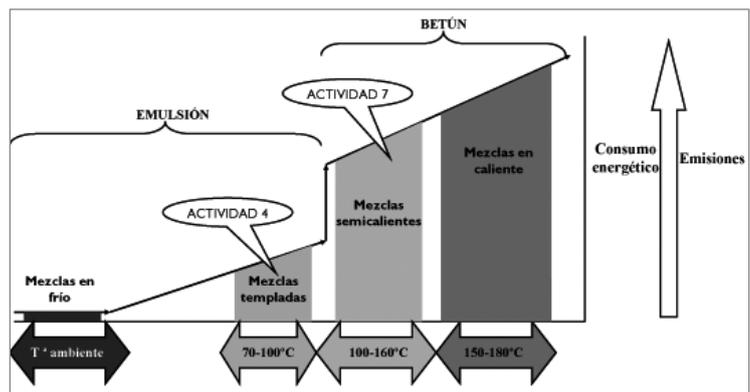


Figura 1. Esquema de las diferentes mezclas asfálticas.

- Aditivos basados en la formulación de tensoactivos 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 aditivos químicos pueden también actuar como *lubricantes* mejorando la trabajabilidad de la mezcla<sup>(3)</sup>.

- 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 ó aditivos tipo Zeolita.

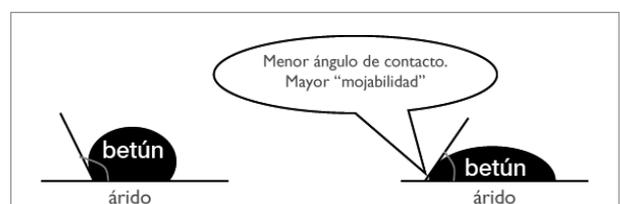


Figura 2. Mejora del ángulo de contacto mediante empleo de tensoactivos.

En el presente artículo nos vamos a centrar fundamentalmente en los aditivos que reducen el ángulo de contacto betún/árido (tensoactivos). Se han medido para ello, en un primer lugar, los ángulos de contacto de betunes aditivados. Posteriormente se han realizado medidas de energías de compactación de estas mezclas a distintas temperaturas. Y por último se han realizado ensayos mecánicos para evaluar sus características prestacionales.

## EQUIPOS EMPLEADOS

### 1. Equipo empleado para el ángulo de contacto

Los ángulos de contacto entre los diferentes betunes y un soporte mineral fueron medidos con un goniómetro de I.T. Concept a temperatura ambiente (ver Foto 1). La medida se llevó a cabo mediante el análisis de una imagen digital de una gota de betún sobre un soporte mineral. Los resultados que se presentan en este trabajo se hicieron sobre un soporte de mica (soporte para microscopio de 3 por 1 pulgadas de Agar scientific). Se hicieron también medidas sobre un soporte de vidrio. Sin embargo, los valores obtenidos fueron menos reproducibles y no son incluidos en esta publicación.

Los diferentes aditivos estudiados en este trabajo fueron previamente añadidos a un litro de betún de penetración 50/70 (1/10 mm) a una temperatura de 160°C y agitados durante 15 minutos. Una pequeña porción de estos betunes se vertió en un molde de silicón para su utilización, una vez enfriado, en la preparación de las gotas.

Fracciones de aproximadamente 2 mg ( $\pm 0,2$  mg) se tomaron con una espátula y se pusieron sobre la mica (cuya superficie se mantuvo libre de polvo hasta justo antes de su utilización). Ningún tratamiento adicional fue hecho sobre la mica para su uso. El sustrato, junto con la porción de betún, se introdujo en un horno previamente precalentado a una temperatura apropiada para fundir el betún (en el caso de este estudio se llevaron a cabo medidas a dos temperaturas: 120 y 140°C).

El sustrato se calienta durante 5 minutos en el horno y se retira para que se enfríe a temperatura ambiente. Se realizaron pruebas con un betún de referencia sobre tiempos de calentamiento diferentes. En tiempos cortos, menos de dos minutos por ejemplo, existe todavía una evolución de la forma de la gota. Tiempos de 5 minutos o más, 10 minutos por ejemplo, resultan en gotas que dejan de cambiar significativamente con el tiempo de calentamiento. Se prestó atención a que el soporte de



Foto 1. Goniómetro para la determinación de ángulos de contacto.

mica estuviera nivelado y suspendido entre los extremos, de manera que el calentamiento y el enfriamiento ocurrieran lo más rápido posible.

Varias gotas del mismo betún se pusieron sobre un mismo soporte de mica, para realizar por lo menos 3 medidas de ángulo de contacto por cada tipo de betún estudiado.

### 2. Compactador Giratorio

La cuantificación de la trabajabilidad de las mezclas asfálticas, sobretodo de las mezclas semicalientes no es una tarea fácil. Se han publicado varios métodos sobre ensayos de laboratorio que permiten su cuantificación<sup>(IV)</sup>. Muchos de estos métodos son solo indicativos de lo que pasa durante la obra. Para evaluar la trabajabilidad de las mezclas aditivadas con tensoactivos en este trabajo se ha empleado el compactador giratorio (ver Foto 2), analizando la resistencia a la compactación de las mezclas asfálticas a distintas temperaturas.



Foto 2. Compactador Giratorio.

En este equipo se ha determinado el esfuerzo cortante, que es una manera de comprobar la facilidad de compactación de las mezclas mediante el estudio del área de esfuerzo cortante necesaria para la compactación de los distintos tipos de mezclas estudiadas. Para ello, se calcula el área acumulada bajo la curva obtenida del esfuerzo cortante en función del número de giros.

Otro método de análisis que permite este equipo es el cálculo de los coeficientes CEI ("Compaction Energy Index") y TDI ("Traffic Densification Index"). Basándose en los resultados obtenidos de las curvas de densificación de las diferentes mezclas, estos parámetros analizan cuán fácil es compactar una mezcla frente a otra y la densificación producida por el tráfico, respectivamente<sup>(iv)</sup>:

- El índice CEI analiza los resultados obtenidos desde el giro 8 hasta alcanzar el 92% de la densidad máxima que correspondería a la densidad mínima para poder abrir al tráfico. Cuanto menor sea este coeficiente mejor se compacta la mezcla.
- El índice TDI está relacionado con las posibles post-densificaciones debidas al efecto del tráfico, por ello se determina con los valores comprendidos entre el 92% de la densidad máxima requerida y el 98% de la densidad máxima, valor considerado como crítico debido a que la mezcla se aproxima a la zona plástica (Figura 3). En este caso, cuanto más alto sea este coeficiente mejor es la mezcla, ya que indica que puede soportar una mayor cantidad de tráfico en su vida útil<sup>(v)</sup>.

A la hora de seleccionar cuál es la mejor mezcla, se deben optimizar ambos índices. En este caso, se ha calculado el índice CEI, que es el que indica cuál es la mezcla que menor energía precisa para la compactación.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 1. Compuestos estudiados

Se han estudiado varios betunes aditivados. Un B60/70: se trata de un betún convencional que será utilizado como referencia. Tres betunes aditivados con distintos aditivos tensoactivos (denominados A, B y C). Y un betún modificado con ceras:

- B 60/70 (referencia), betún 1,
- B 60/70 + 0,4 % Tensoactivo A, betún 2,

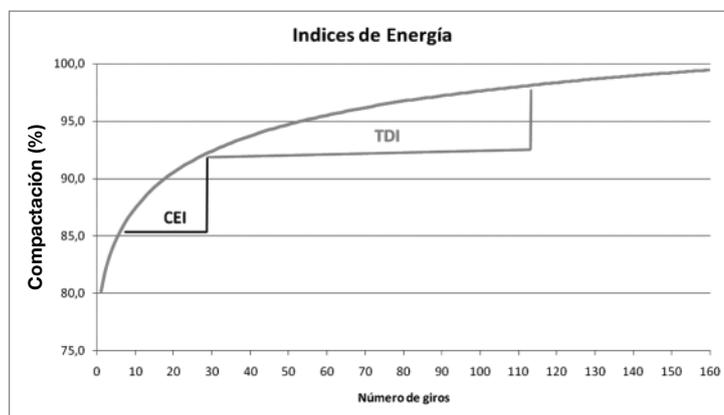


Figura 3. Medida de los coeficientes CEI y TDI analizando las curvas de compactación.

- B 60/70 + 0,4 % Tensoactivo B, betún 3,
- B 60/70 + 0,4 % Tensoactivo C, betún 4, y
- B 60/70 + 3 % Cera, betún 5.

Como se ha explicado anteriormente los betunes aditivados con tensoactivos mejoran la tensión superficial árido/betún mejorando la *mojabilidad* y el modificado con cera afecta a la viscosidad del betún.

### 2. Resultados de la medida del ángulo de contacto

La evaluación de la tensión superficial de betunes es aún objeto de estudio y debate. No hay, por el momento, un método establecido simple que permita cuantificar la tensión superficial del betún (con materiales sólidos o aun líquidos). La viscosidad del betún, y su fuerte dependencia de la temperatura, es una de las causas fundamentales de la dificultad de la medida que hacen las medidas clásicas de tensión superficial, como las existentes para líquidos como el agua, impracticables.

Uno de los métodos que aparece en la literatura para evaluar la tensión superficial de betunes es la medida de los ángulos de contacto de una superficie cubierta de betún con diversos líquidos (por ejemplo agua, ioduro de metilo, etilen glicol etc...)<sup>(vi)</sup>. Aunque este tipo de método permite la determinación de la tensión superficial del betún, el método es elaborado y es prácticamente imposible de evaluar el efecto de la temperatura, por lo menos a temperaturas relevantes a la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Por eso desarrollamos un método simple para la evaluación de ángulos de contacto de betunes sobre soportes minerales sólidos. Aun cuando este método, descrito en

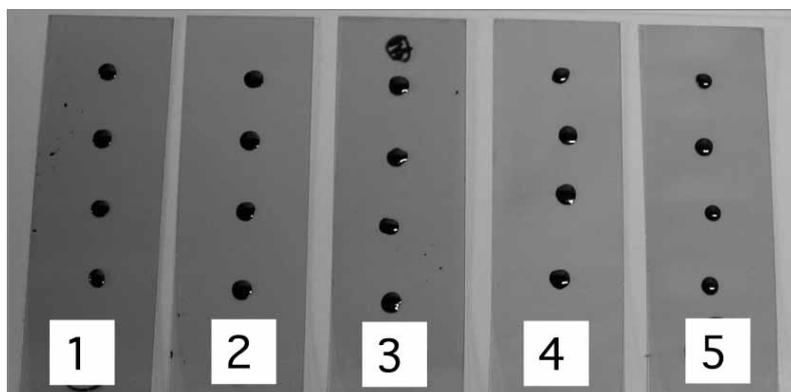


Foto 3. Gotas de betun sobre soporte de mica para la medición de ángulo de contacto.

el apartado de equipos empleados, no sea una medida de la tensión superficial o de un ángulo de contacto rigurosamente al equilibrio termodinámico, aporta, sin embargo, información de carácter comparativo sobre la interfase entre un betún y un sólido a diferentes temperaturas.

La Foto 3 muestra las gotas de los diferentes betunes sobre el soporte de mica después de un tratamiento de 120°C de 5 minutos. Se puede ver que todas las porciones de betún se fundieron y formaron gotas.

En la Figura 4 se muestran los ángulos de contacto observados de los diferentes betunes después de un tratamiento térmico a las temperaturas indicadas. Se puede observar que en general los ángulos de contacto del betún sobre la mica varían significativamente entre 18 y 30 grados. Después de un tratamiento de 120°C durante 5 minutos, las diferencias entre los diferentes betunes son más evidentes que a 140°C.

En general, se confirmó que los betunes que contienen tensoactivos (betunes 2, 3 y 4) tienen un ángulo de contacto inferior al betún de referencia (betún 1). Este no fue el caso para el betún 5 que contiene la cera. Esta diferencia de comportamiento es probablemente ligada a dos factores: la ausencia de un carácter tensoactivo de la cera utilizada y el tratamiento térmico utilizado.

Es probable que el tiempo de tratamiento, aun cuando es suficiente para llegar a un equilibrio para el betún de referencia, es insuficiente para fundir a la totali-

dad las ceras (incrementando la viscosidad del betún). El ángulo de contacto del betún 5 fue el que más cambió con la temperatura, debido probablemente, a una mayor fusión de la cera contenida en el betún.

A 120°C existe una ligera diferencia en la reducción del ángulo de contacto entre los betunes que contienen tensoactivos. El betún 2 (tensoactivo A) es el que menos modifica el ángulo del betún de referencia (aproximadamente 3 grados), mientras que el betún 4 (con el tensoactivo C) es el que más lo reduce (5 grados). A 140°C, sin embargo, la diferencia entre los ángulos de betunes con tensoactivos es menos significativa, sin embargo los valores siguen siendo inferiores al del betún de referencia.

Es posible imaginar llevar a cabo medidas similares sobre sustratos preparados a partir de verdaderos áridos para poder comparar el efecto de diferentes petrografías sobre diferentes aditivos. Este tipo de medidas sobre áridos será posiblemente objeto de un estudio en el futuro.

### 3. Resultados de las medidas de la energía de compactación

De acuerdo con lo descrito anteriormente se ha medido la energía de compactación (CEI) necesaria para compactar mezclas asfálticas tipo AC16Surf desde el giro 8 hasta alcanzar el 92% de la densidad máxima. Un menor índice indica que resulta más fácil la compactación. Este estudio se ha realizado para los distintos ligantes a varias temperaturas (ver Tabla 1 y Figura 5).

Como podemos apreciar, la energía de compactación resultante en el betún de referencia no difiere mucho del resto a la temperatura de 160 °C. Sin embargo, conforme

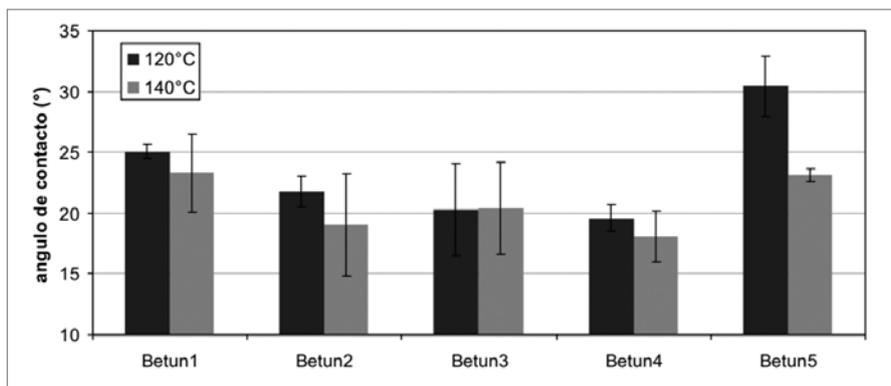


Figura 4. Medidas de los ángulos de contacto de los diferentes betunes después de un tratamiento térmico a la temperatura indicada.

Mezcla AC16S	CEI		
	Temperatura (°C)		
	160	140	120
(1) Referencia	13.690	22.329	25.088
(2) Tensoactivo A	10.818	13.705	13.682
(3) Tensoactivo B	15.421	15.445	15.406
(4) Tensoactivo C	13.719	17.301	19.795
(5) Cera	10.896	10.815	13.756

Tabla 1. Resultados de las energías de compactación CEI a distintas temperaturas.

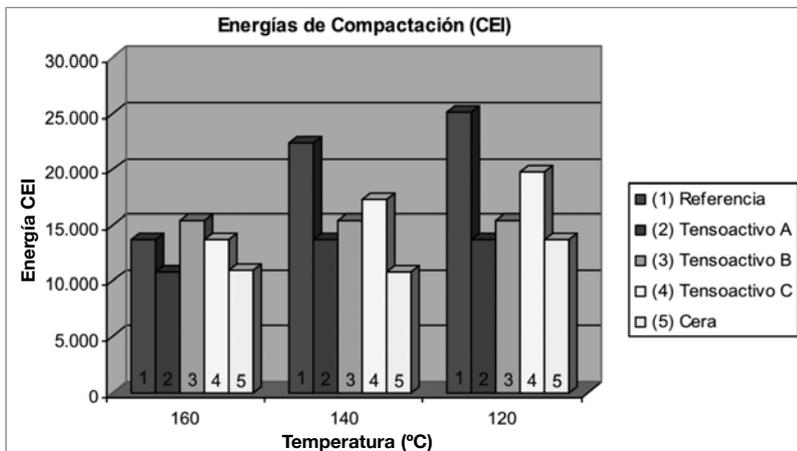


Figura 5. Representación de las energías de compactación a distintas temperaturas.

disminuimos las temperaturas de fabricación y compactación, las diferencias respecto a los betunes aditivados aumentan considerablemente.

Las energías para estos ligantes son bastante menores poniendo de manifiesto que la disminución que estos aditivos (tipo tensoactivo) tienen sobre el valor del ángulo de contacto árido/betún, afecta positivamente a la energía necesaria para la compactación de mezclas fabricadas con ellos (necesitamos menos energía para alcanzar la compactación deseada). Sin embargo, no se encontró una correlación entre el grado de disminución del ángulo de contacto y la energía de compactación.

Con el aditivo tipo cera también se obtiene energía de compactación menor pero en este caso es por la reducción que este aditivo produce en la viscosidad del betún y no por fenómenos superficiales como ocurre en los casos anteriores.

Las energías obtenidas para las muestras aditivadas son menos sensibles a los cambios de temperaturas de fabricación y compactación que la muestra de referencia. Este fenómeno hace que sea posible reducir sensiblemente estas

temperaturas de fabricación y compactación con las ventajas medioambientales que esto supone.

#### 4. Resultados de las medidas del área acumulada del esfuerzo cortante

Con los datos obtenidos durante la compactación mediante la máquina giratoria se han representado, para una misma temperatura de fabricación, el área del esfuerzo cortante acumulada durante todo el proceso de compactación frente al porcentaje de compactación alcanzado.

En la Figura 6 están representadas las áreas acumuladas del esfuerzo cortante a distintas temperaturas para el betún de referencia. Como podemos observar esta área es mayor a temperaturas más bajas, lógicamente cuesta un mayor esfuerzo compactar mezclas más frías.

Si analizamos los resultados obtenidos para las mezclas que incorporan tensoactivos, ver Figura 7, obtenemos resultados muy similares a los que obteníamos cuando analizábamos los parámetros CEI.

En la Figura 7 se puede observar como a 160 °C las áreas acumuladas son parejas para las distintas mezclas. De hecho, la mezcla de referencia se sitúa en el centro de todas. Conforme disminuimos las temperaturas de fabricación y compactación, la curva correspondiente a la mezcla de referencia se aleja de las correspondientes

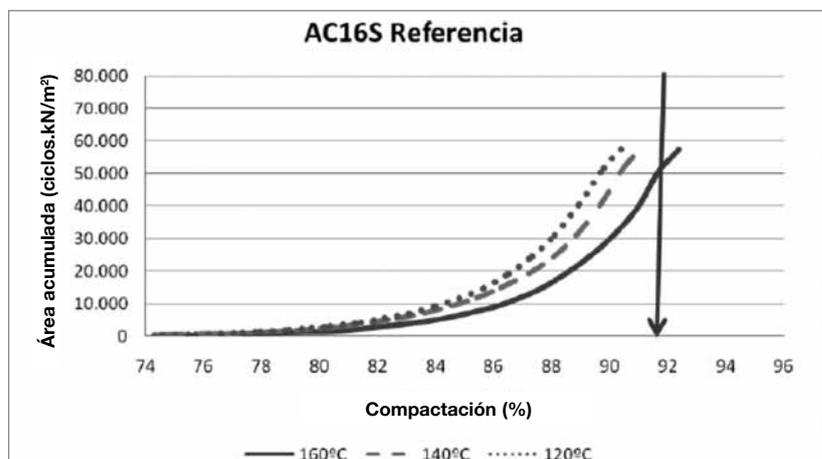


Figura 6. Representación de las áreas acumuladas del esfuerzo cortante a distintas temperaturas para el betún de referencia.

a las mezclas aditivadas, que prácticamente no alteran su posición al disminuir la temperatura.

Podemos afirmar que el esfuerzo cortante durante la compactación aumenta al bajar la temperatura de trabajo para una mezcla fabricada con un ligante convencional; pero sin embargo, permanecen prácticamente inalteradas cuando las mezclas están aditivadas con tensoactivos.

## 5. Resultados ensayos mecánicos

### 5.1. Sensibilidad al Agua (UNE-EN 12697-12)

Se ha realizado un estudio de la adhesividad árido-ligante según el procedimiento que marca la norma UNE-EN 12697-12. Este ensayo analiza el efecto de la saturación y la inmersión acelerada en agua en la resistencia a tracción indirecta en probetas de tipo Marshall.

Se han fabricado de forma individual, con la amasadora mecánica y el óptimo de ligante (4,85% s/m) 8 probetas AC16Surf B60/70 para cada tipo de aditivo a las tres temperaturas de estudio, separándolas en dos grupos de forma homogénea según su densidad. Uno de los grupos se conservó en una sala a una temperatura de 20°C y otro se sumergió en agua a 40°C durante tres días después de haber sido sometido a tratamiento en vacío durante 30 minutos, según indica la UNE-EN 12697-12. Una vez transcurridos los tres días, se procedió a acondicionar las mezclas en una cámara a 15°C durante dos horas previas al ensayo.

Posteriormente se procedió a realizar el ensayo de tracción indirecta a los dos grupos de probetas, según la UNE-EN 12697-23, mediante una máquina universal de ensayos estática. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 8.

Como podemos ver en el gráfico de la Figura 8, a 160 °C todas las mezclas tienen una resistencia conservada cercana al 90%. Conforme disminuimos la temperatura podemos apreciar una importante caída en este valor para el betún de referencia, llegando a 120 °C a alcanzar un valor

del 55%. Para los betunes aditivados se observa que la caída de resistencia conservada es mucho menor (a 120 °C rondan el 80 %).

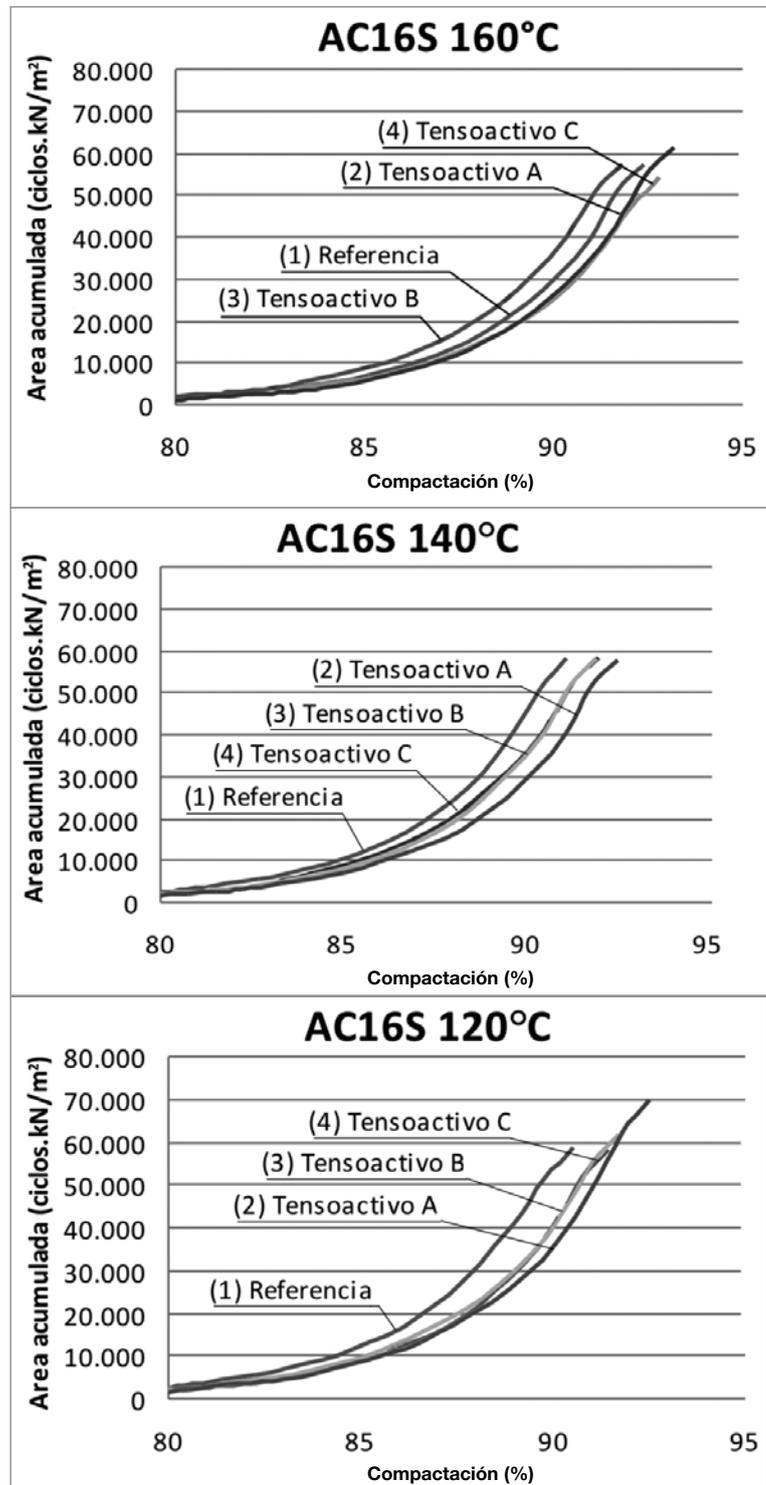


Figura 7. Representación de las áreas acumuladas del esfuerzo cortante a distintas temperaturas para el betún de referencia y para los betunes aditivados con tensoactivos.

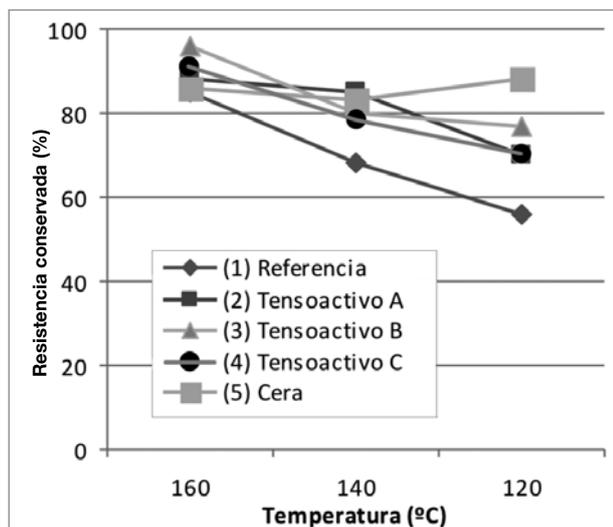


Figura 8. Resistencias conservadas para los distintos ligantes a diferentes temperaturas de trabajo.

La resistencia conservada se ve afectada cuando disminuimos las temperaturas de trabajo de las mezclas. Sin embargo, la incorporación de estos aditivos minimiza en gran medida este efecto, sobre todo a temperaturas inferiores. Este efecto benéfico de los tensoactivos es esperado ya que la reducción de la tensión interfacial (mejor mojado de los áridos por el betún) ayuda en gran medida a evitar el desplazamiento del betún por el agua durante el acondicionamiento en agua.

En el caso de la cera, la mejora en resistencia conservada es probablemente debida sobre todo al aumento de viscosidad del betún a las temperaturas a las que se lleva a cabo la prueba. Las ceras, al cristalizar, endurecen el betún haciendo más difícil al agua desplazar al betún de la superficie del árido.

## 5.2. Módulos de Rigidez (UNE-EN 12697-26)

Uno de los procedimientos para conocer el comportamiento estructural en carretera de las mezclas bituminosas es la medición de los módulos de rigidez. La forma de ensayo viene especificado en la norma UNE-EN 12697-26:2006, empleando entre los diferentes procedimientos especificados en la norma,

el método recogido en el anexo C: *Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (ITT-CY)*. Dicho módulo se calcula a 20°C.

Para la realización del ensayo se empleó una máquina dinámica Zwick con una célula de carga de 10kN (ver Figura 9). Se han fabricado cuatro probetas tipo AC16Surf B60/70 por cada tipo de mezcla (referencia y mezcla con aditivos) a las tres temperaturas de ensayo (160, 140 y 120 °C). Tal y como especifica la norma UNE-EN 12697-26, las probetas se mantuvieron a una temperatura constante de 20°C en una sala climatizada al menos durante un período de 24 h.

Posteriormente se realizó el ensayo mediante tracción indirecta (ITT), apoyando la probeta sobre una generatriz aplicando una carga de compresión vertical en la generatriz opuesta, midiendo la deformación que sufre la probeta en un plano que pasa por el eje Y, perpendicular al de la aplicación de la carga (Figura 9). Cada ensayo consta de 16 ciclos de carga de 3 s cada uno. Únicamente se emplean los ciclos del 11 al 15 para el cálculo de los módulos ya que los anteriores se consideran como de asentamiento de la probeta.

En la gráfica de la Figura 10 se representan los resultados obtenidos en este ensayo.

Se puede apreciar nuevamente como la caída del módulo al bajar las temperaturas de trabajo es mucho mayor en el betún de referencia. Parece que la incorporación de estos aditivos hace que las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa sean menos susceptibles a las disminuciones de temperatura de fabricación y compactación.

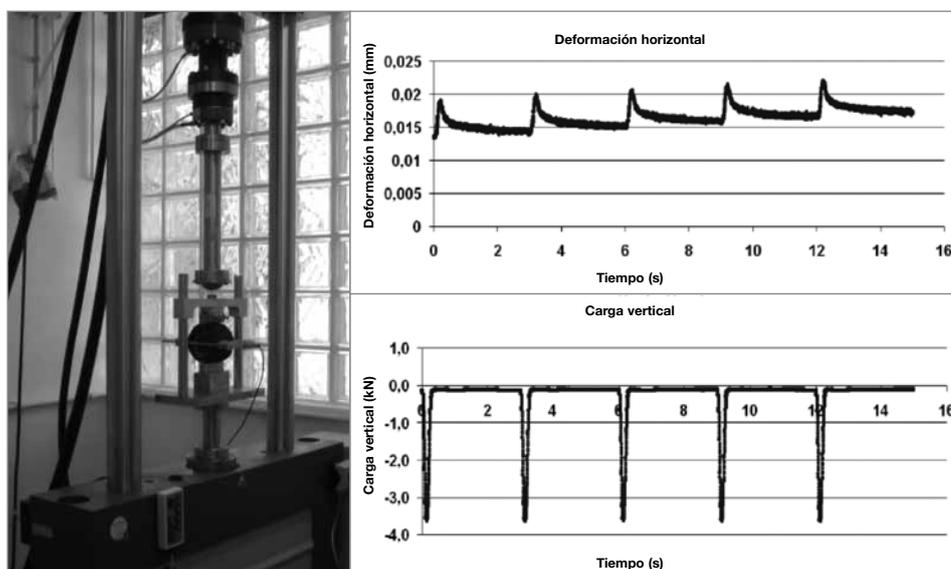


Figura 9. Equipo empleado para la medida del módulo de rigidez y forma de realizar los ciclos de carga del ensayo.

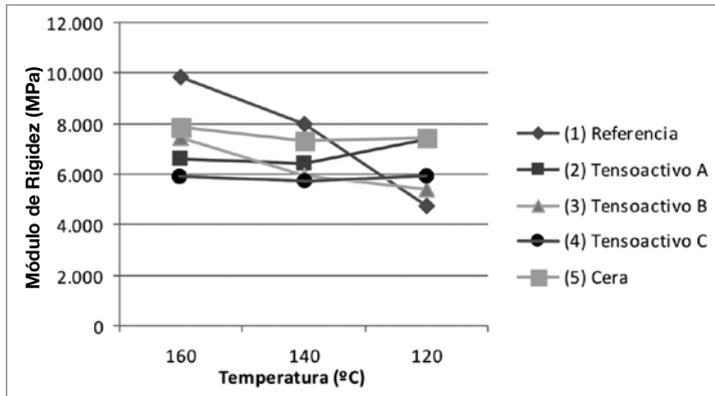


Figura 10. Módulos de rigidez para los distintos ligantes a diferentes temperaturas de trabajo.

Ligante	T fabricación (°C)	T compactación (°C)
(1) B 60/70	160	150
(3) B 60/70 + tensoactivo B	130	120
(5) B 60/70 + cera	130	120

Tabla 2. Temperaturas de fabricación y compactación para las mezclas sometidas al ensayo de fatiga.

### 5.3. Ensayo de Fatiga

También se han realizado ensayos de fatiga para evaluar la durabilidad de mezclas fabricadas con estos tipos de aditivos. En este caso sólo se han estudiado el ligante de referencia (1), el ligante + tensoactivo B (3), y el ligante + cera (5).

Para ello se fabricaron y compactaron las mezclas asfálticas a las temperaturas detalladas en la Tabla 2.

Como podemos ver en la Figura 11, respecto a la resistencia a la fatiga de estas mezclas bituminosas, se puede observar que las pendientes de las tres mezclas son muy parecidas. Si se analiza la deformación al millón de ciclos

para las mezclas estudiadas, se podría observar que todas tienen aproximadamente el mismo valor, lo cual pone de manifiesto, que el comportamiento a fatiga de las tres mezclas estudiadas es muy similar, pese a que las mezclas aditivadas fueron fabricadas y compactadas 30 °C menos que la mezclas de referencia.

### CONCLUSIONES

El método desarrollado para la evaluación del ángulo de contacto permite comparar el efecto de diferentes aditivos sobre las propiedades del betún colocado sobre un soporte mineral. La disminución del ángulo de contacto gracias a los tensoactivos se observó a través de este método. Las diferencias más importantes entre los ángulos observados se encontraron a temperaturas más bajas, como se observó también en algunos de los parámetros estudiados en las mezclas.

Aún cuando se observaron diferencias en los ángulos de contacto entre los diferentes betunes con tensoactivos, no hay una correlación evidente entre una mayor o menor reducción de ángulo de contacto con la mica y las propiedades medidas en las mezclas asfálticas preparadas con estos aditivos.

De manera particular podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Los aditivos tipo tensoactivos afectan al ángulo de contacto betún/árido, reduciendo el valor de este y por lo tanto, aumentando la *mojabilidad* del ligante en los agregados.

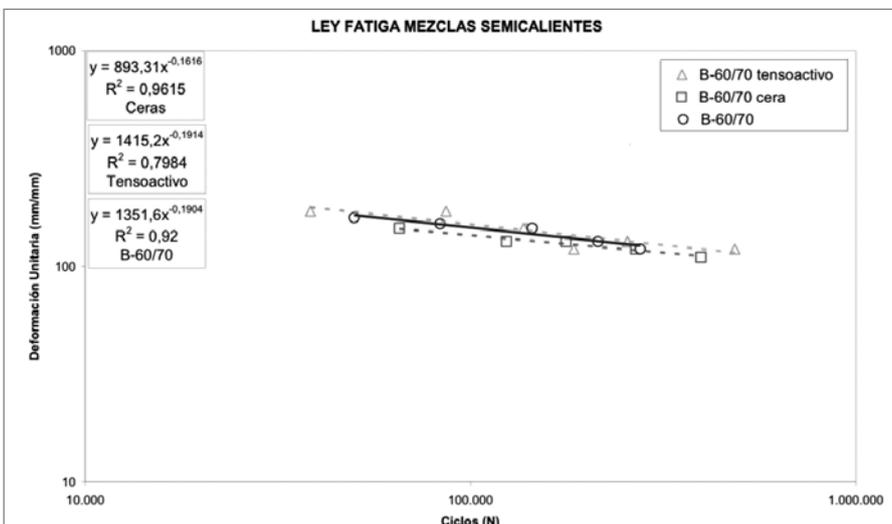


Figura 11. Leyes de fatiga para la mezcla de referencia y para las mezclas semicalientes.

- Esta reducción del ángulo de contacto pudiera estar relacionada a la energía de compactación (CE) y la energía acumulada del esfuerzo cortante, necesitando por lo tanto estas mezclas menor energía durante su proceso de compactación.

- Las mezclas a las que se han incorporado tensoactivos son menos susceptibles a las disminuciones de temperaturas de fabricación y compactación en lo que respecta a sus propiedades mecánicas (sensibilidad al agua y módulo de rigidez).

- Respecto a la durabilidad las mezclas semicalientes, tanto fabricadas con tensoactivo como con cera, presentan una resistencia a la fatiga prácticamente igual que las mezclas convencionales, pese a ser fabricadas a menor temperatura (30 °C menos)

## AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix ([www.proyectofenix.es](http://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 (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá de Henares, 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. "Sistemas de Fabricación de Mezclas Semicalientes y Templadas". Ramón Tomás Raz. Jornada Nacional de Asefma 2009
- II. "Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas". S. Gil, J.I. Amor, J. Felipe, A. Costa, C. Cortés, A. Páez, F. Valor, J.J. Potti. IV Jornada Nacional de Asefma 2009
- III. "Mezclas Asfálticas Templadas con Aditivos Químicos". J.A. González, L. Grampé, G. Barreto. Jornada Nacional de Asefma 2009
- IV. Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W. y Mooney, K. "Assesment of Workability/Compactability of Warm Mix Asphalts". TRB Washington enero 2010
- V. Mahmoud, Ahmed F.F.; Bahia, Hussain (2004) "Using gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures." Report WHRP 05-02. Wisconsin Highway Research Program, 2004.
- VI. Hefer, A.W; Bhasin, A.; Little, D.,N. "Bitumen surface energy characterization using contact angle approach" Journal of materials in civil engineering Noviembre/Diciembre 2006. 

