

# **NUEVOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**Félix PÉREZ JIMÉNEZ.** Catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña  
**Rodrigo MIRÓ RECASENS.** Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Cataluña

## 1.- INTRODUCCIÓN

El ensayo y caracterización de mezclas y ligantes bituminosos siempre ha presentado cierta dificultad, principalmente debido a la complejidad de los productos ensayados. El comportamiento mecánico de una mezcla o de un ligante bituminoso se puede asimilar en unos casos al de un sólido elástico, en otros al de un cuerpo viscoso, y en otros al de un material plástico. No es extraño, por tanto, que cuando nos refiramos a las mezclas bituminosas las definamos como un material elasto-visco-plástico. Esto es debido a que la respuesta de las mezclas y de los ligantes bituminosos varía con la temperatura a que se realicen los ensayos y con la duración de la carga aplicada. A temperaturas bajas y tiempos muy cortos de aplicación de carga, las mezclas se comportan elásticamente. Por el contrario, a temperaturas altas y largos periodos de aplicación de cargas, la respuesta de las mezclas es visco-plástica.

A temperaturas altas, la propiedad mecánica que más nos interesa de la mezcla es su estabilidad, mientras que a temperaturas bajas nos preocupa su resistencia a la fisuración por esfuerzos térmicos. A temperaturas medias nos importa su módulo y su resistencia a fatiga. De estas cuatro propiedades, a la que más importancia se ha prestado y se ha tenido más en cuenta para la caracterización de mezclas y de ligantes bituminosos, ha sido la primera, la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas. Ni que decir tiene que ésta es una de las propiedades fundamentales de una mezcla, pero cuando la intentamos relacionar, como se hace en los métodos funcionales de caracterización de ligantes, SHRP por ejemplo, con las propiedades del ligante, hemos de tener muy en cuenta que la estabilidad de la mezcla depende de las características del ligante, pero que, en muchos casos, es predominante la granulometría de los áridos y el rozamiento interno de su esqueleto mineral. Así lo atestigua la experiencia española, donde el grave problema que tuvimos en la década de los años 60 y 70 de deformaciones plásticas, se resolvió cambiando la granulometría y composición de las mezclas utilizadas en ese momento, que seguían las recomendaciones del Instituto del Asfalto, aumentando el rozamiento interno de su esqueleto mineral y rebajando el porcentaje de árido fino y de ligante. Los mismos ligantes que antes se comportaban mal, resultaron excelentes con este nuevo tipo de mezcla. Por ello, y aunque hayamos elegido un ligante conforme a las condiciones climatológicas y de tráfico a la que estará sometida la mezcla, la estabilidad de ésta ha de ser evaluada siempre, por la influencia que puede tener el contenido de ligante y su granulometría. Para ello contamos con ensayos experimentales muy sencillos, como el Marshall o el estabilómetro Hveem, o de simulación, como la máquina de pista, relativamente sencillo, que nos permiten su fácil caracterización.

El comportamiento a fatiga es otra de las propiedades fundamentales que deberíamos considerar al caracterizar una mezcla bituminosa. Durante su vida de servicio en el firme, la vamos sometiendo a una serie de sollicitaciones a flexotracción, que aunque muy inferiores a las que producirían su rotura, acaban fisurándola por fatiga. Sin embargo, y pese a su importancia, esta propiedad apenas se tiene en cuenta en el diseño de la mezcla. Esto es debido fundamentalmente a la carencia de ensayos prácticos y sencillos que permitan su evaluación. Esta propiedad depende de la granulometría y porcentaje de huecos de la mezcla, pero, sobretodo, de las características del ligante empleado. En la nueva metodología SHRP se tiene en cuenta esta propiedad en la selección del ligante bituminoso a aplicar en la mezcla, en función de la componente imaginaria de su módulo complejo, indicándose también un

ensayo laborioso y costosísimo para la evaluación de la resistencia a fatiga de la mezcla.

A bajas temperaturas, el principal problema de las mezclas bituminosas es su fisuración por retracción térmica. Al bajar la temperatura aumenta el módulo de rigidez de la mezcla y disminuye la ductilidad del betún, llegando un momento en que el betún no puede soportar el incremento de tensiones y deformaciones a que se ve sometido, fisurándose la mezcla. La respuesta de la mezcla a bajas temperaturas depende en su mayor parte del tipo de ligante empleado y del porcentaje del mismo. Para mejorar esta propiedad en la mezcla es conveniente emplear betunes que mantienen su ductilidad a bajas temperaturas y aumentar su contenido. La medida de esta propiedad de la mezcla no resulta muy difícil de realizar, pero se ha de contar, como mínimo, con una prensa de tracción y una cámara termostática que permita ensayar a temperaturas muy bajas. Si intentamos relacionar esta propiedad de la mezcla con el comportamiento del ligante a bajas temperaturas, tal y como hace el procedimiento SHRP, veremos que esto requiere el uso de ensayos muy complejos y costosos para la caracterización del betún.

Además, si de verdad queremos conocer cuál va a ser el comportamiento mecánico de una mezcla, hemos de tener en cuenta que estas propiedades pueden variar por envejecimiento del ligante, o al ser desplazado éste de la mezcla por acción del agua. Es decir, debemos comprobar también la resistencia a la oxidación del ligante bituminoso y la buena adhesividad de éste a los áridos de la mezcla.

Lo anteriormente expuesto sirve para poner de manifiesto la complejidad que plantean la caracterización completa de las mezclas bituminosas, por la variedad de propiedades a determinar y por la carencia de ensayos prácticos y sencillos que permitan esta labor. Otra conclusión importante es la tendencia existente, sobretodo a partir del SHRP, a caracterizar funcionalmente los ligantes bituminosos, relacionando las propiedades reológicas de éstos con los de la mezcla, aunque hay que remarcar el efecto que sobre esta relación tiene la tipología de la mezcla.

Es por ello, que el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado un método funcional para la caracterización de betunes, basado en las propiedades mecánicas que el ligante proporciona a la mezcla, y que puede analizar y comparar, al mismo tiempo, betunes convencionales y modificados; de ahí su denominación de método Universal de Caracterización de Ligantes (método UCL). Es un ensayo que se caracteriza sobretodo por su sencillez y la fácil interpretación y valoración de sus resultados. Por otra parte, para la caracterización de las mezclas se ha desarrollado el ensayo BTM, que permite determinar la energía y la deformación de rotura de la mezcla, parámetros directamente relacionados con su comportamiento a fatiga.

Las ideas anteriormente expuestas están resumidas y concretadas en el cuadro adjunto, Tabla 1, en el que se relacionan las propiedades de la mezcla, los ensayos y metodología empleados hasta ahora para controlar y optimizar estas propiedades, así como las nuevas líneas de caracterización y diseño abiertas por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Éstas han ido dirigidas allí donde más carencia había, que son en todos los campos, salvo en el estudio de la deformabilidad de la mezcla.

Estos dos procedimientos de ensayo serán expuestos a continuación junto con la aplicación del ensayo de Tracción Indirecta para el control de calidad de la ejecución

de mezclas bituminosas. Estos tres ensayos representan las tres principales líneas de investigación en curso en el Laboratorio de Caminos, y se recogen en este artículo de forma resumida, con el fin de presentar de forma conjunta la labor realizada por el Laboratorio en el desarrollo de nuevos ensayos para la caracterización de ligantes y mezclas asfálticas.

Condiciones de servicio	Propiedad mezcla	Factores comportamiento	Caracterización mezcla	Ensayo	Caracterización ligante	Ensayo
Temperaturas altas y/o Cargas lentas	Estabilidad	- Tipo ligante - Granulometría (rozamiento) - Dosificación - Huecos	Experimental	Marshall Hveem	Tradicional	A y B e I.P.
					SHRP	Reómetro (G*senφ)
			Volumétrico	Giratoria	UCL	Poder aglomerante (inconsistencia)
			Simulación	Pista		
Temperaturas medias y Cargas rápidas	Fatiga Módulo	- Tipo ligante - Granulometría - Dosificación - Huecos	Flexotracción (dinámico)	Varios	Tradicional	---
					SHRP	Reómetro (G*x senφ)
			Tracción Indirecta (dinámico)	Varios	UCL	Poder aglomerante (curva estado)
			Energía Fractura (dinámico/estático)	BTB		
Temperaturas bajas y Cargas rápidas	Fisuración	- Tipo ligante - Dosificación	Tracción	Varios	Tradicional	Fraas
					SHRP	Bending Beam Direct tension
			Tracción/energía	BTB	UCL	Poder aglomerante (fragilidad)

**Tabla 1. Propiedades fundamentales y ensayos para la caracterización de mezclas y ligantes bituminosos.**

## 2.- MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (MÉTODO UCL)

El método UCL ha sido desarrollado pensando en la caracterización de los ligantes desde el punto de vista de su utilización en carreteras. No se ha tenido en cuenta su consistencia, su composición, su viscosidad, sino aquellas características que están relacionadas con las propiedades que debe proporcionar el ligante a la mezcla para su adecuado comportamiento en el firme. Es decir, de un ligante bituminoso nos interesa:

- *Su poder aglomerante.* Cohesión que proporciona a la mezcla.
- *Su fluencia/fragilidad. Susceptibilidad térmica.* El comportamiento mecánico de los ligantes bituminosos varía con la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. A temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el ligante puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o tiempos cortos de aplicaciones de carga, el ligante se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad.

- *Su durabilidad/adhesividad.* La acción del agua produce un efecto de desenvuelta, siendo muy importante conocer la adhesión del ligante al árido en presencia de agua (adhesividad).
- *Su durabilidad/envejecimiento.* Por acción del aire, del calor y de los rayos ultravioletas se va produciendo una oxidación y envejecimiento del ligante, haciéndose éste cada vez más duro y frágil.

Para la medida de estas propiedades se ha desarrollado un nuevo procedimiento, basado en la medida de la cohesión proporcionada por el ligante a una mezcla patrón y como varía ésta con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento del ligante.

### Cohesión/Poder aglomerante

La cohesión de un ligante, su poder aglomerante, es lo que permite a la mezcla resistir los esfuerzos del tráfico. Es esta propiedad la que verdaderamente nos interesa en la caracterización de un ligante. Por ello, se ha definido esta propiedad como una característica fundamental del ligante, y se ha valorado a partir de la resistencia a la disgregación que el ligante proporciona a una *mezcla patrón*, de granulometría y composición definida, mediante el ensayo cántabro a la temperatura de 25°C.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste consiste en introducir en el molino del ensayo de Los Angeles una probeta Marshall y someterla al ensayo de desgaste sin ningún tipo de carga abrasiva. Durante el ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta, determinándose tras un número de revoluciones, 100, 200 ó 300, la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento, al peso inicial:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100$$

siendo:

$P_c$  = Pérdidas al cántabro (%)  
 $P_i, P_f$  = Peso inicial y final, en gramos

La mezcla patrón se fabrica a partir de unos áridos sanos y limpios, con un desgaste de Los Angeles inferior a 25, y una absorción inferior al 1.5%. Su granulometría es abierta, sin finos ni filler, lo que proporciona un alto porcentaje de huecos en mezcla, del 26±1%, facilitando la circulación del aire por la probeta en el ensayo de oxidación.

Tamices UNE (mm)	5	2.5	0.63
% Pasa	100	80	0

La probeta se fabricará siguiendo el procedimiento Marshall, pero empleando en la compactación únicamente 50 golpes por cara. El peso de los áridos para la elaboración de la probeta es de 1000 g, y el porcentaje de betún es del 4,5% sobre áridos.

El ensayo cántabro, por ser un ensayo experimental, no determina ningún parámetro fundamental de la mezcla, como podría ser el ángulo de rozamiento, el módulo, etc.,

pero sí da una idea clara de la capacidad del ligante para mantener unidos los áridos en la mezcla, y cómo, cuando estas uniones son dúctiles y tenaces, las pérdidas son bajas, y cuando resultan frágiles o poco consistentes, las pérdidas aumentan. Cada aplicación de carga en el firme o cada vuelta en la máquina de Los Angeles da lugar a un proceso de deterioro. Hay una parte de esta energía de deterioro que es absorbida en la deformación elástica del material, otra parte se elimina en su deformación plástica y el resto es la que produce su fisuración o rotura.

Las condiciones de ensayo de la probeta varían según la variable estudiada: susceptibilidad térmica, adhesividad o envejecimiento.

### **Susceptibilidad térmica**

En el caso de estudiar la susceptibilidad térmica, las probetas se mantienen en el congelador, frigorífico o estufa el tiempo necesario para adquirir la temperatura de ensayo: 60, 40, 25, 10, -10 y -30°C. El ensayo se realiza en la máquina de Los Angeles, que debe encontrarse ubicada en una habitación a 25°C. La duración del ensayo es de 8-9 minutos, por lo que las variaciones de temperatura son pequeñas y similares en cada punto de ensayo. Se consigue así determinar de forma continua cómo va cambiando el comportamiento mecánico del ligante, cuándo se comporta frágilmente o de forma inconsistente. Características que, como hemos comentado en el punto anterior, son las que realmente preocupan al ingeniero de carreteras.

### **Adhesividad**

El procedimiento desarrollado se basa en determinar el incremento de las pérdidas en el ensayo cántabro tras un período de inmersión en agua de la probeta. Este periodo es de 24 horas a 60°C o de 4 días a 49°C.

Es importante señalar que la granulometría de la *mezcla patrón* es muy abierta, sin finos ni polvo mineral, con lo que el ensayo evalúa realmente la adhesividad del betún a las partículas del árido empleado.

### **Envejecimiento**

El envejecimiento del ligante se hace directamente en la mezcla, en película fina, dada la alta porosidad de la granulometría empleada y la ausencia de finos y polvo mineral. Se introduce la probeta en una estufa de aire forzado a la temperatura de 80 ó 163°C, y se ensaya tras diferentes periodos de permanencia.

## **2.1.- EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO**

El procedimiento ha sido aplicado con éxito en la evaluación de diferentes tipos de betunes, obteniéndose resultados altamente interesantes como muestran las figuras adjuntas.

GRANULOMETRÍA T-2. ÁRIDO GRANÍTICO

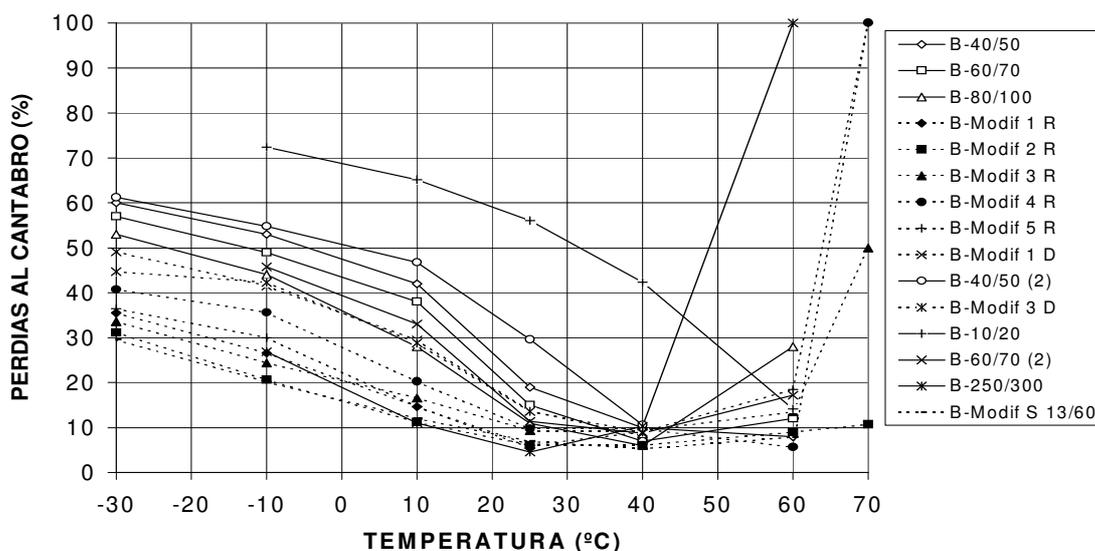


Figura 1. Curvas de estado.

En la Figura 1 puede verse la curva de estado de una amplia gama de ligantes ensayados, y en ellos puede apreciarse fácilmente cómo el método muestra de forma clara la diferencia entre los distintos tipos de betunes, estando completamente separada la zona correspondiente a los betunes normales de penetración y los modificados. Estos últimos presentan claramente una menor susceptibilidad térmica, encontrándose sus curvas de estado en la parte inferior de la figura.

También podemos apreciar en dicha figura, la capacidad del método para distinguir la diferencia de comportamiento según su penetración. Las curvas que presentan mayores pérdidas a temperaturas bajas son las correspondientes a los betunes de menor penetración, mayor fragilidad, mientras que a temperaturas altas son estos betunes los que menores pérdidas presentan, mayor consistencia. A su vez, se aprecia la capacidad del método para diferenciar incluso el comportamiento de los betunes de la misma penetración, según su mayor o menor susceptibilidad térmica. Al igual que en el procedimiento SHRP, podemos establecer diferentes grupos de los ligantes en función de su pérdida a 25°C, poder aglomerante del betún, y dentro de estos grupos, establecer categorías y rangos en función de su temperatura de fragilidad, en que la mezcla patrón tiene unas pérdidas superiores a 50%, y su temperatura de inconsistencia, en que las pérdidas a altas temperaturas son superiores también al 50%. Al igual que sucede en el procedimiento SHRP, los valores que definen el intervalo nos darán una idea del campo de aplicación del betún, cuanto menor sea la temperatura de fragilidad mejor será su repuesta a bajas temperaturas, y cuanto más alta sea la temperatura de inconsistencia, mejor será su comportamiento a altas temperaturas. Además cuanto mayor sea el rango del intervalo, mejor será el betún, que podrá ser aplicado en un rango más amplio de temperaturas.

La facilidad del método UCL para mostrar las diferencias de adhesividad entre un árido y diferentes tipos de ligantes, puede ser observado en la figura 2, donde se muestra las pérdidas en seco y tras inmersión de tres betunes de penetración B-60/70 y dos modificados. Se aprecia, sobre todo, el efecto beneficioso de los betunes modificados para mejorar esta adherencia.

La diferencia de comportamiento ante el envejecimiento de los betunes puede ser observado fácilmente con este método, figura 3. En este caso se observa claramente la diferencia de comportamiento de dos betunes modificados, uno que conserva en gran medida sus propiedades en el tiempo, mientras que en el otro se produce un rápido proceso de envejecimiento.

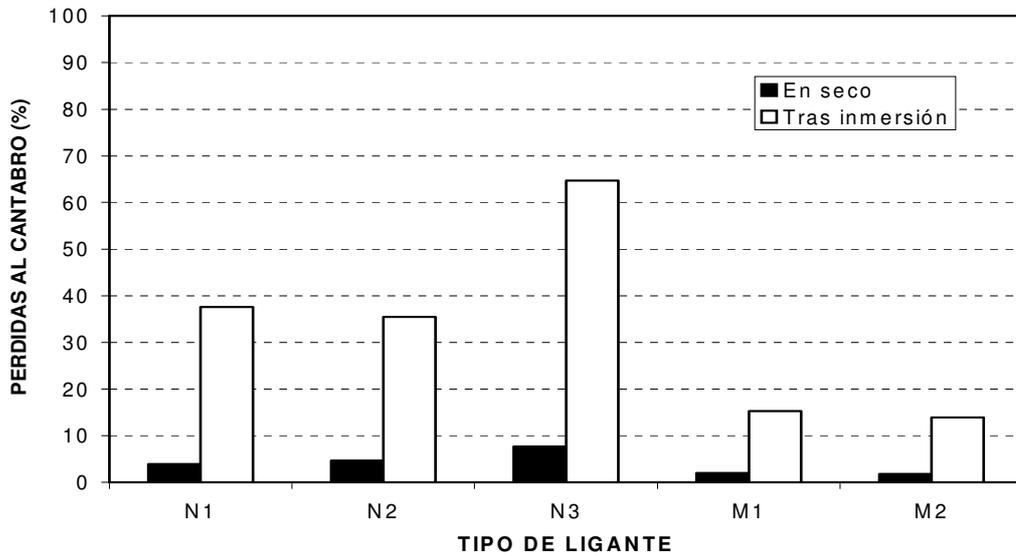


Figura 2. Adhesividad árido-ligante.

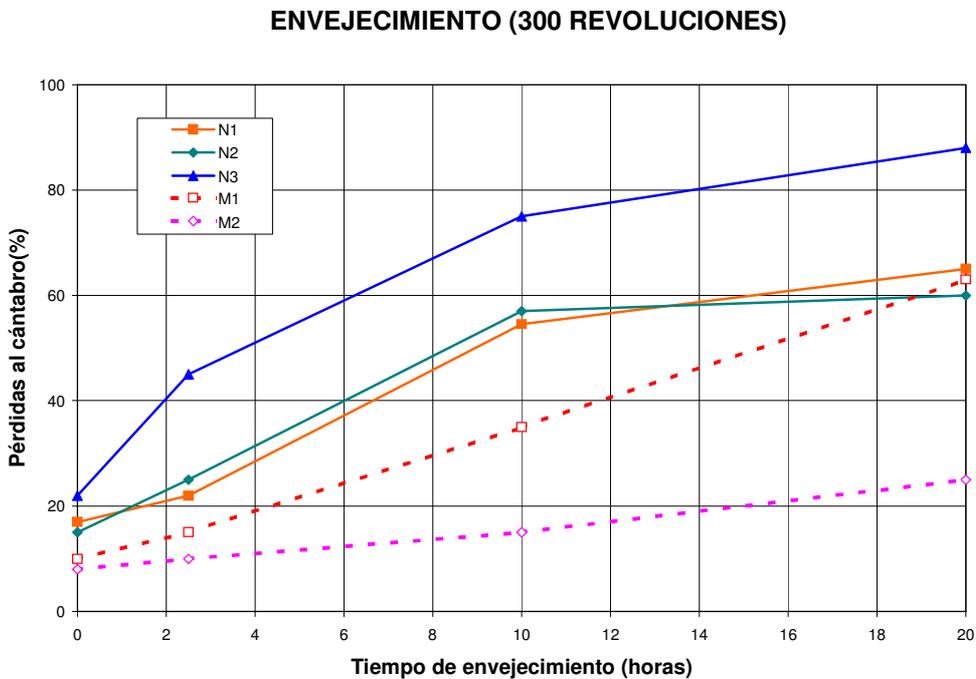


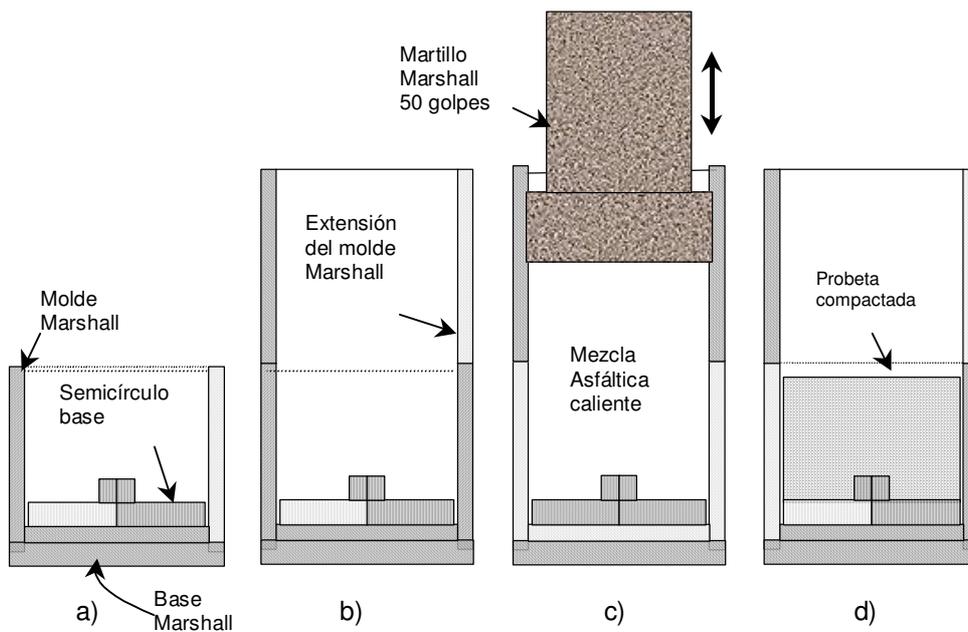
Figura 3. Curvas de envejecimiento.

### 3.- ENSAYO BTM. APLICACIÓN A LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA Y DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

La dificultad de evaluar la resistencia a la fisuración de la mezcla por fatiga se debe a la complejidad de los ensayos empleados en su determinación. Se trata de ensayos dinámicos para los que es necesario disponer de prensas dinámicas y unos equipos muy complejos de medida y de adquisición de datos. Es por ello, que en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha llevado a cabo un estudio con el fin de poder correlacionar el comportamiento de la mezcla a fatiga con su tenacidad, energía de rotura, determinada con un ensayo simple de tracción directa, Ensayo BTM.

Mediante la aplicación del ensayo BTM de tracción directa se determina la tenacidad y la deformación de rotura "dR" de la mezcla. Aplicando este procedimiento bajo carga dinámica se obtiene su vida por fatiga y la deformación crítica "dC", deformación a la que se produce la rotura a fatiga y es constante para cada mezcla con independencia del nivel de esfuerzos a que se realice el ensayo de fatiga y, que puede ser considerada como una característica de la mezcla. También se ha observado una clara correlación entre la deformación crítica y la de rotura de la mezcla, así como entre la vida de fatiga y el cociente entre la deformación unitaria impuesta a la mezcla y su deformación crítica. Todo ello nos ha permitido establecer un procedimiento para estimar la vida de fatiga de la mezcla a partir de su tenacidad, determinada a partir de un ensayo de tracción directa, ensayo Barcelona Tracción Directa.

El ensayo BTM está basado en un procedimiento especial para la fabricación de probetas que permite ensayarlas a tracción. La probeta se fabrica en la compactadora Marshall sobre una base constituida por dos semicírculos con un resalto en la zona de contacto, lo que crea una hendidura en la parte central de la probeta, y un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos de tracción, ver Figura 4.

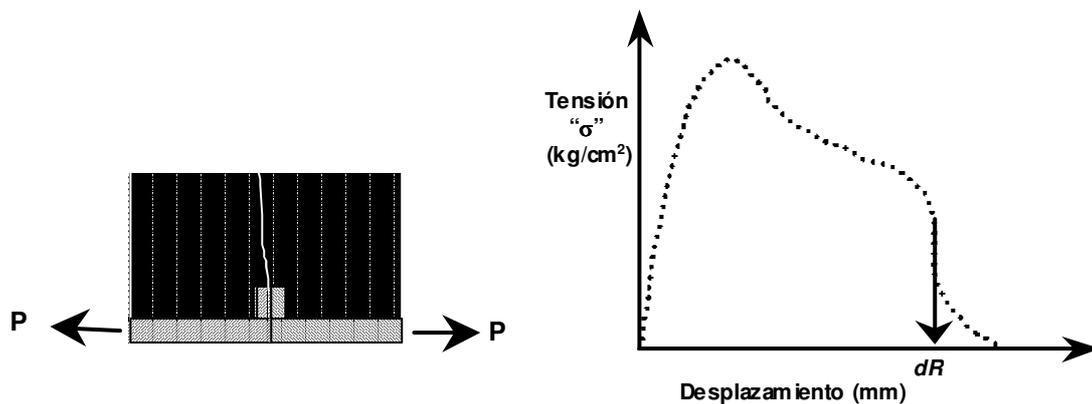


**Figura 4. Proceso de elaboración de probetas en el ensayo BTM.**

El ensayo puede ser realizado en el modo estático aplicando una velocidad de deformación fija o bien, en el modo dinámico, aplicando una carga senoidal de amplitud y frecuencia constante. El primer procedimiento es empleado para determinar la energía y deformación de rotura de la mezcla; el segundo, para estudiar su comportamiento a fatiga. Las condiciones en que se han realizado los ensayos y las variables medidas en cada uno de los procedimientos son las indicadas a continuación:

**Procedimiento estático**

En la modalidad estática, Figura 5, el ensayo consiste en aplicar un desplazamiento a velocidad uniforme de 1,0 mm/minuto, manteniendo la temperatura constante, a 5°C, en el estado aquí recogido, hasta llegar a carga cero, es decir, hasta la rotura total de la probeta. Durante el ensayo se registra el esfuerzo de tracción (kg/cm<sup>2</sup>) en función del desplazamiento ( $\Delta$ ) y con él se puede evaluar la energía de fractura y obtener los valores de la resistencia máxima a tracción y su deformación de rotura  $dR$ .



**Figura 5. Ensayo BTB en el modo estático y curva carga-desplazamiento obtenida.**

**Ensayo de fatiga**

En el segundo procedimiento, utilizando los mismos dispositivos mecánicos que en el ensayo estático, se somete la probeta a fatiga, es decir, a una carga dinámica de tracción hasta su fisuración, Figura 6. La carga varía con el tiempo de acuerdo a una función senoidal de 10Hz y el ensayo se realiza a una temperatura constante, a 5°C, en el estado aquí presentado. La prueba termina cuando la fisura generada por fatiga se propaga a todo el espesor y separa en dos partes la probeta. En este procedimiento se miden el número de ciclos de carga aplicados ( $N$ ) y las deformaciones unitarias producidas en la fibra superior de la probeta ( $\epsilon_s$ ) mediante un extensómetro. Además se registra la abertura de las mordazas, en milímetros, producida en la base de la probeta durante el ensayo de fatiga.

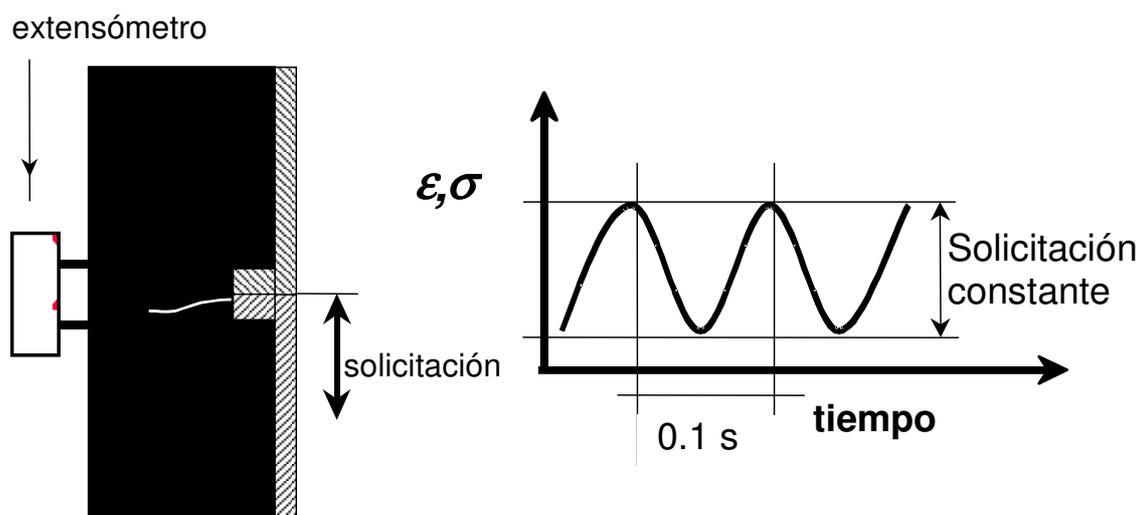


Figura 6. Ensayo BTD en el modo dinámico a fatiga por tracción directa.

Variando las amplitudes de las sollicitaciones obtenemos la ley de fatiga para la mezcla bituminosa ensayada. Además, se obtienen las *curvas de deformación acumulada*, abertura de las mordazas en mm, con el número de ciclos aplicados  $N$ , en las cuales puede observarse claramente que existe una “deformación crítica”  $dC$ , característica para cada tipo de mezcla, a partir de la cual la fisuración se propaga muy rápidamente.

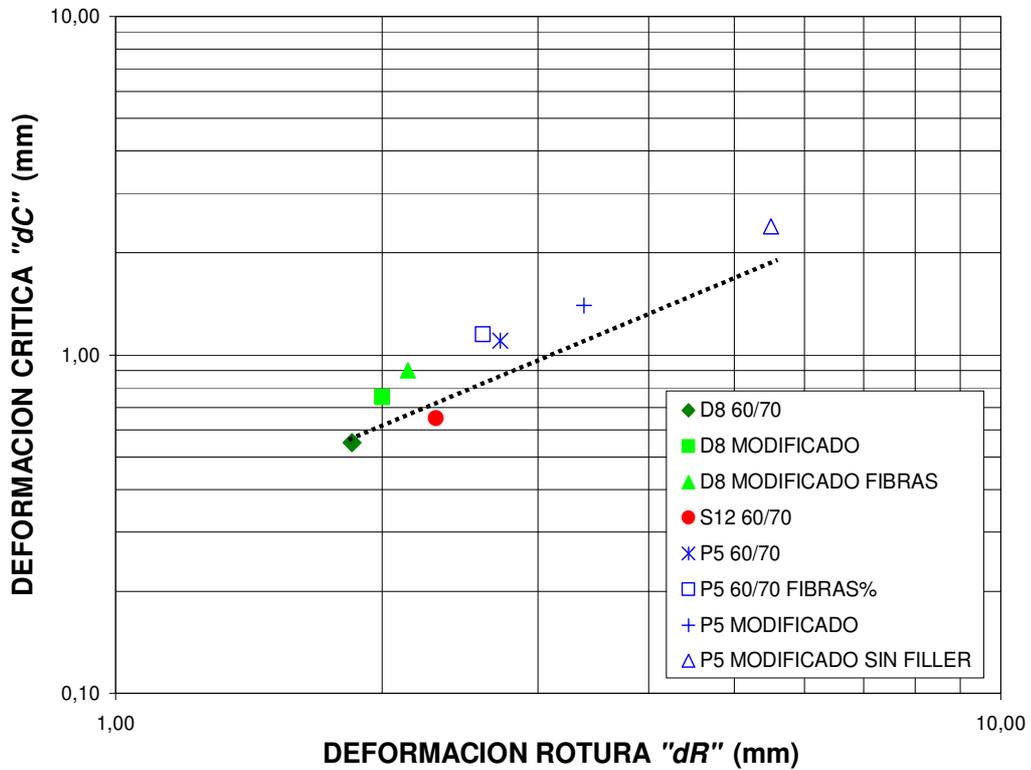
La resistencia a fatiga de la mezcla, número de ciclos hasta la fisura, se relaciona en este ensayo con la deformación unitaria en la fibra inferior de la probeta ( $\epsilon_i$ ), que es donde se inicia la fisuración. Ésta se calcula a partir de la carga aplicada ( $P$ ), la geometría de la probeta y la deformación unitaria registrada en la parte superior de la probeta ( $\epsilon_s$ ) medida con un extensómetro.

### 3.1.- Energía y deformación de rotura. Comportamiento a fatiga

El objetivo principal de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas y su relación con la energía de rotura. Tras la ejecución del modo estático del ensayo BTD, se observó que cada mezcla tiene una “deformación de rotura”  $dR$ , que la caracteriza. Del modo dinámico se obtienen, también para cada mezcla, además de las leyes de fatiga y los módulos  $S$ , las *curvas de deformación acumulada* en las cuales se observó un parámetro denominado “deformación crítica”  $dC$ , que es único para cada mezcla, con independencia de la magnitud de las tensiones aplicadas.

A partir de lo anterior y analizando los resultados de los ensayos realizados, se ha obtenido que existe una excelente correlación entre la deformación de rotura  $dR$  y la deformación crítica,  $dC$ , figura 7. De acuerdo con estos resultados y dada la variedad de mezclas ensayadas,- densas, semidensas, abiertas, con fibras, con betunes modificados, etc.- puede admitirse que esta correlación podría aplicarse de forma

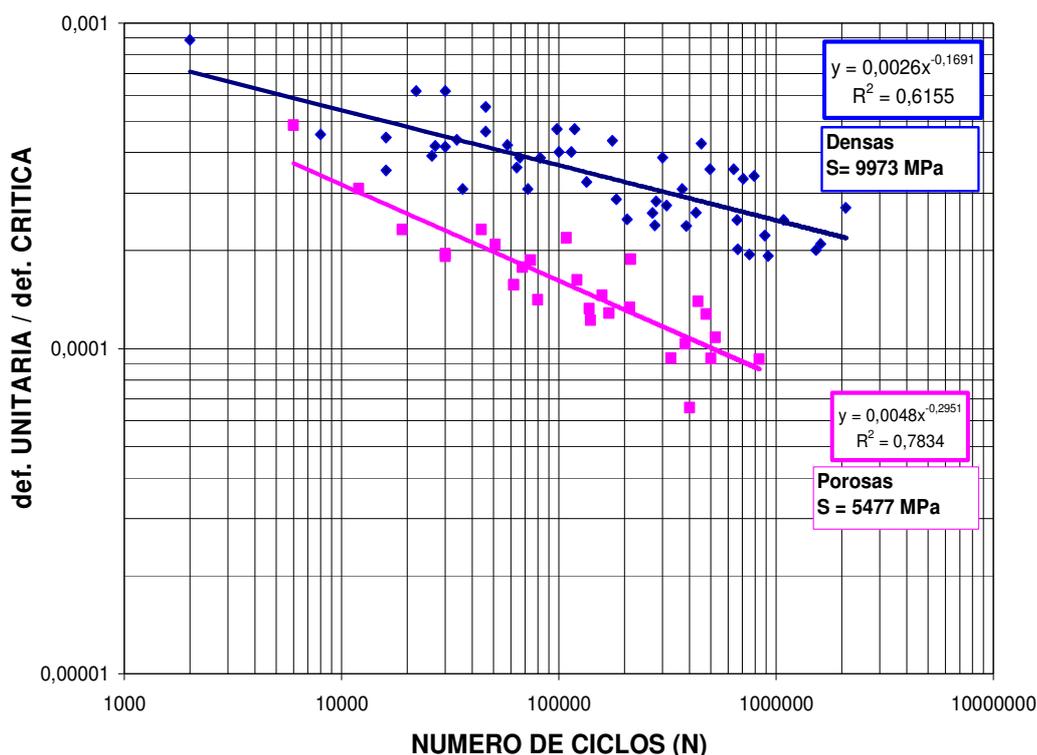
general a todas las mezclas españolas, tal como se recoge en el procedimiento que mas adelante se expone para estimar el comportamiento a fatiga de una mezcla a partir de su respuesta en el ensayo BTM de rotura a tracción.



**Figura 7. Correlación entre la Deformación Crítica "dC" (modo dinámico) y la Deformación de Rotura "dR" (modo estático) obtenidas con el ensayo BTM a 5°C.**

Lo mismo sucede si se relaciona la deformación crítica  $dC$  del modo dinámico con la carga máxima  $P$  o con el área total bajo la curva carga-deformación obtenidas del modo estático, aunque los resultados no se muestran aquí.

Otra relación muy interesante que se encontró en los datos del modo dinámico del ensayo, es que existe una clara "tendencia" al relacionar el cociente resultante entre la deformación unitaria y la deformación crítica ( $\epsilon_i/dC$ ) con la vida a fatiga ( $N$ ), tanto para el grupo de las mezclas densas y semidensas como para el grupo formado por las porosas, tal como se observa en la Figura 8.



**Figura 8. Correlación entre el cociente de la Deformación Unitaria y la Deformación Crítica ( $\epsilon_i/dC$ ) y la vida a fatiga ( $N$ ).**

El hecho anterior resulta de gran relevancia puesto que si se cuenta con correlaciones entre la tenacidad (modo estático) y la fatiga (modo dinámico del ensayo BTD), es decir, entre la deformación de rotura  $dR$  y la deformación crítica  $dC$ , como las mostradas en la Figura 7, y además se tienen otras que relacionan la deformación unitaria impuesta con la deformación crítica ( $\epsilon_i/dC$ ) y la vida a fatiga  $N$  para diferentes mezclas, con distintos porcentajes y tipos de betún, y diferentes áridos, estaremos en condiciones de poder predecir la resistencia a la fisuración por fatiga de la mezcla que deseamos utilizar en un pavimento sólo con ensayarlas a tracción y determinar su deformación de rotura. Bastaría realizar el ensayo BTD sólo en su modalidad estática y obtener su deformación de rotura  $dR$ , para luego encontrar su deformación crítica  $dC$ , entrando a la Figura 7.

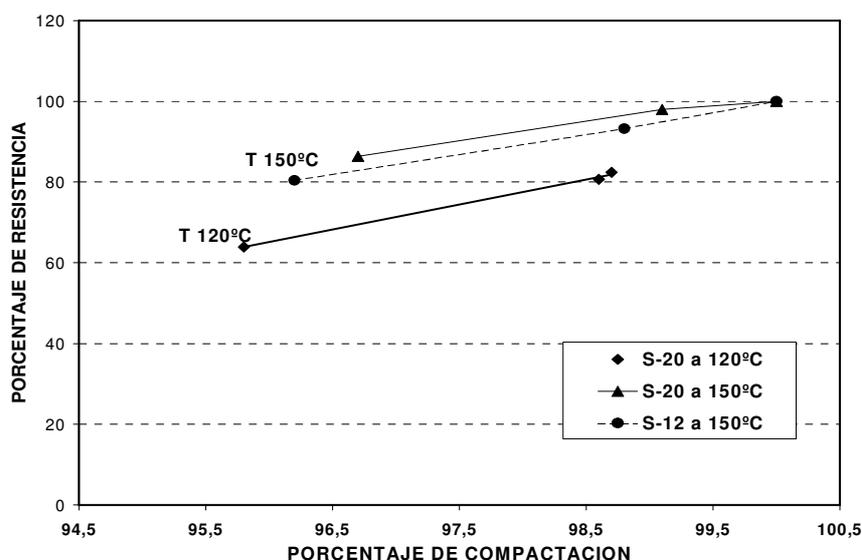
Conociendo la deformación unitaria  $\epsilon_i$  admisible en la capa de mezcla bituminosa y la deformación crítica  $dC$  (ya obtenida para la mezcla a utilizar), se tiene el dato necesario para entrar en la Figura 8 que relaciona el cociente de la deformación unitaria y la deformación crítica ( $\epsilon_i/dC$ ) con la vida a fatiga y obtener el número de ciclos de carga  $N$  que soportará la mezcla antes de que se fisure, es decir, su resistencia a la fisuración por fatiga.

#### 4.- APLICACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA AL CONTROL DE EJECUCIÓN DE LA MEZCLA

El control de ejecución de las mezclas bituminosas en caliente suele hacerse sobre su composición, a través de ensayos de extracción, y sobre su compactación y estabilidad, según el procedimiento de ensayo Marshall.

La composición y las características mecánicas se controlan sobre el producto fabricado, mientras que en obra sólo se verifica la compactación alcanzada, determinando la densidad de testigos extraídos y comparándolos con la densidad patrón. De este modo, no se considera el efecto que las etapas posteriores a la fabricación: transporte, extendido y compactación pueden tener sobre las características mecánicas de la mezcla, que no siempre están relacionadas con la densidad.

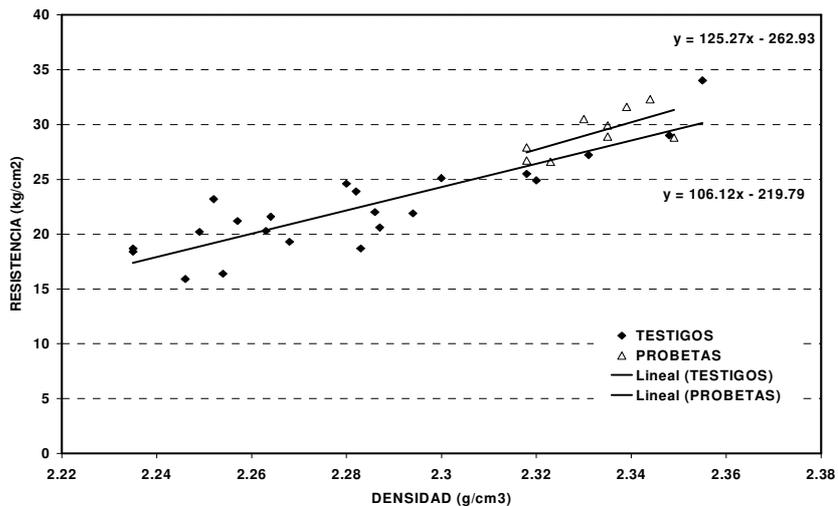
Es posible llegar a los niveles de compactación normalmente exigidos en obra del 97-98% compactando a bajas temperaturas, pero la resistencia de la mezcla se reduce notablemente. Esta reducción no se detecta con los procedimientos actuales de control de calidad, basados únicamente en el control de la compactación, Figura 9.



**Figura 9. Variación del porcentaje de resistencia en función del porcentaje de compactación. Mezclas S-20 y S-12.**

Es por ello que se ha desarrollado una investigación que permite establecer unos criterios de calidad basados en las características mecánicas del producto final. Se ha pensado en el empleo del ensayo de tracción indirecta con el fin de evaluar la cohesión del producto final, ensayando testigos extraídos de la capa ejecutada según el ensayo descrito en la NLT 346/90, para la determinación de su resistencia a tracción indirecta a 5°C.

El ensayo de tracción indirecta ha sido aplicado en el control de calidad de diferentes obras realizadas en Cataluña, durante casi dos años. Se han estudiado mezclas densas, semidensas y gruesas, con variación de tamaño máximo de 25, 20 y 12 mm. Las nubes de puntos obtenidas para cada caso se distribuyen de forma aproximadamente lineal y las pendientes de las rectas calculadas por regresión pueden agruparse con tendencias paralelas en muchos casos. Existe una relación entre la compacidad y la resistencia a tracción indirecta para todas las mezclas estudiadas, como se observa en la Figura 10.



**Figura 10. Correlación resistencia-densidad con probetas y testigos. Mezcla S-20.**

En la Tabla 2 se han recogido, para las diferentes capas asfálticas controladas, los valores de compacidad y de resistencia media encontrados. En la misma tabla se observa, para cada tipo de mezcla empleada, la resistencia obtenida en laboratorio en probetas fabricadas con el 4,5% de B-60/70 y áridos gruesos calizos o graníticos.

El análisis de esta tabla permite resumir lo siguiente:

Las mezclas D-20 y S-20 tienen resistencias en obra que varían entre 25 y 30 kg/cm², con compacidades que a veces alcanzan el 97%, mientras que en laboratorio se obtienen resistencias que van desde 38 kg/cm² a 32 kg/cm² según sea el árido calizo o granítico respectivamente.

Para las mezclas D-12 y S-12 los valores de resistencia oscilan entre 17 y 25kg/cm², pero en laboratorio esta resistencia es de casi 40kg/cm² con árido calizo para ambas mezclas, y de 35kg/cm² para las mezclas densas con árido granítico.

TIPO DE MEZCLA	PROP.	TESTIGOS OBRA					LABORATORIO	
		I	II	III	IV	V	LAB. C	LAB. G
D-20	C	97,5	97,5	95,1			100	
	$\sigma$	29,5	28,7	25,9			38,5	
D-12	C	94,5	95,7				100	100
	$\sigma$	19,5	18,5				39,2	35
S-20	C	97,8	97,7	95,1	98,6		100	100
	$\sigma$	28,9	26,9	25,9	24,7		37,8	32,3
S-12	C	96,1	97,1	95,6	96,9	95,4	100	
	$\sigma$	24,8	21,6	19,7	19,4	17,1	39,8	
G-25	C	99,7	99,4				100	
	$\sigma$	29,7	26,2				34,7	
G-20	C	97,8	99,6	98,4	96		100	100
	$\sigma$	23,4	24,1	19,2	21,2		35,2	31,3

**Tabla 2. Valores de compacidad, C (%) y resistencias medias,  $\sigma$  (kg/cm<sup>2</sup>)**

Estas mezclas son las que presentan mayores diferencias entre la compacidad y resistencia obtenidas en obra y en laboratorio. Han sido ejecutadas normalmente en capas delgadas, y ponen en evidencia el problema existente en la ejecución de estas capas, pues mezclas trabajables y fáciles de compactar en laboratorio, presentan una menor compacidad y resistencia en obra. El motivo aparente de estas diferencias puede ser una disminución importante de temperatura al extender y compactar la mezcla en obra.

Las mezclas gruesas casi siempre alcanzan altas compacidades, en el caso de las G-25 con resistencias entre 25 y 30kg/cm<sup>2</sup>, y en las G-20 entre 20 y 25kg/cm<sup>2</sup>, aunque estos valores no pueden compararse directamente con las resistencias de laboratorio, de 35kg/cm<sup>2</sup> para calizos y 31kg/cm<sup>2</sup> para graníticos, debido a los diferentes porcentajes de ligante empleados en uno y otro caso, alrededor del 3,75 – 4,0% en obra y 4,5% en el laboratorio.

**4.1.- ANÁLISIS DE RESULTADOS DE RESISTENCIAS OBTENIDAS. CRITERIOS DE CALIDAD PROPUESTOS**

Tras la aplicación del ensayo sobre testigos extraídos y su comparación con los obtenidos en probetas, se ha observado que las rectas de regresión resistencia-densidad presentan una tendencia a alcanzar, para el 100% de compactación, la resistencia de las probetas fabricadas en planta, a pesar de la diferencia de resistencias observadas entre ambas. Cuanto menor sea esta diferencia mayor será la calidad conseguida, convirtiéndose por tanto, en un índice de la calidad conseguida en la ejecución de la obra.

También se han podido establecer unos niveles mínimos de resistencia a exigir a los diferentes tipos de mezcla del Pliego, de acuerdo a los resultados analizados en la Tabla 1. A partir de estos resultados pueden deducirse también unas resistencias mínimas a exigir a las mezclas de acuerdo con su tipo de granulometría:

Mezclas D-20 y S-20: 25 kg/cm<sup>2</sup>  
 Mezclas D-12 y S-12: 20 kg/cm<sup>2</sup> (deseable 25 kg/cm<sup>2</sup>)  
 Mezclas G-25 y G-20: 20 kg/cm<sup>2</sup>

Se define además un factor de calidad de la obra relacionado con la resistencia media de las probetas, la resistencia media de los testigos y la compactación mínima exigida en obra, dado por la siguiente expresión:

$$FC = [ R_p - (100 - \%C) * b ] - R_t$$

donde:

FC: factor de calidad  
 R<sub>p</sub>: resistencia media de las probetas  
 C: porcentaje de compactación exigido en %  
 b: pendiente de la correlación obtenida para los testigos entre la resistencia y la compactación  
 R<sub>t</sub>: resistencia media de los testigos

La expresión dentro del corchete representa la resistencia teórica de los testigos, teniendo en cuenta la menor compactación exigida en obra. Considerando que la resistencia de los testigos puede ser un poco menor por su superficie irregular y las posibles dispersiones del ensayo, debería especificarse la diferencia máxima admisible entre estas dos resistencias en una obra bien realizada.

## 5.- CONCLUSIONES

La caracterización de las mezclas y ligantes bituminosos presenta nuevos horizontes si en vez de seguir siempre profundizando en el problema de la deformabilidad de la mezcla, nos preocupamos por las otras propiedades de las mezclas y de los ligantes bituminosos. Una de estas propiedades, puede ser por ejemplo, el poder aglomerante de un ligante, que aunque sea la propiedad que los define, nunca hasta ahora se ha tenido en cuenta en su caracterización. Lo mismo ocurre con el concepto o idea de flexibilidad de la que hacemos uso para referirnos a los pavimentos asfálticos, en el sentido de que estos pueden deformarse y adaptarse a los asientos de la explanada, sin romperse o fisurarse, en contraposición a los firmes rígidos, constituidos por materiales no deformables que se fisuran con pequeños asientos. Pues bien, son precisamente estas dos características básicas, las que el Laboratorio de Caminos ha tenido presente para desarrollar sus nuevos procedimientos de ensayo, método UCL y ensayo BTB.

El método UCL está basado en la determinación de la resistencia a la disgregación de una mezcla patrón mediante el ensayo cántabro, permitiendo la caracterización de los ligantes bituminosos en función de la cohesión que éstos proporcionan a la mezcla y su variación con la temperatura, humedad y envejecimiento.

El ensayo BTM permite estimar el comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa a partir de su energía y deformación de rotura, determinada mediante un simple ensayo estático de tracción directa.

Por otra parte, los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo de tracción indirecta han demostrado la posibilidad de emplear este ensayo en la caracterización de las mezclas bituminosas y en el control de su ejecución. Del estudio realizado se deduce que existe una correlación entre la densidad y la resistencia a tracción indirecta de la mezcla, y que esta última es un parámetro capaz de evaluar a la mezcla con mayor sensibilidad que la obtenida mediante el uso de la compacidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- PEREZ JIMENEZ, F; MIRO, R; MARTIN, T; DES CROIX, Ph. “Ligantes bituminosos: Procedencia, composición, características y comportamiento”. Carreteras, nº 88. Madrid, 1997.
- PEREZ JIMENEZ, F; MIRO, R. “Caractérisation mécanique de liants asphaltiques: méthode UCL”. Fith International RILEM Symposium. Lyon, 1997.
- PEREZ JIMENEZ, F; MIRO, R. “Evaluación de la cohesión y susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL”. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Sevilla, 1999.
- DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; FRANCKEN, L. "Fatigue of bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Interlaboratory Tests". Mechanical Tests for Bituminous Materials, 5<sup>th</sup> MTBM RILEM, pp. 15-26. Lyon, 1997.
- MIRÓ RECÁSENS, R; PÉREZ JIMÉNEZ, F.; FONSECA RODRÍGUEZ, C. “Aplicación del ensayo BTM de tracción directa al estudio y dosificación de microaglomerados”. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, pp 629-639. Sevilla, 1-6 Noviembre 1999.
- PEREIRA, P.; PAIS, J.; SOUSA, J. “Comparison between laboratorial and field bituminous mixtures”. Mechanical Tests for Bituminous Materials, 5<sup>th</sup> MTBM, RILEM 1997, pp. 291-297. LYON 1997.
- PÉREZ JIMÉNEZ, F.; MIRÓ RECÁSENS, R.; FONSECA RODRÍGUEZ, C.; CANCER, J.M. "Reflective Cracking: A New Direct Tensile Test and using a Computerized Programme of Finite Elements with a Model of Continuous Damage". Third International RILEM Conference “Reflective Cracking in Pavements”, pp 250-259. Maastricht, October 1996.
- PÉREZ JIMÉNEZ, F.; MIRÓ RECÁSENS, R; FONSECA RODRÍGUEZ, C. “Essai BTM pour la détermination de la ténacité et résistance au fissurage des mélanges bitumineux”. Quatrième Symposium International RILEM “Essais mécaniques pour les matériaux bitumineux”, pp 391-396. Lyon, Mai 1997.
- PARTL, M; FRANCKEN, L. “RILEM Interlaboratory tests on stiffness properties of bituminous mixtures”. Mechanical Tests for Bituminous Materials, 5<sup>th</sup> MTBM, RILEM

1997, pp. 9-14.. LYON 1997.

- SAID, SAFWAT F.; WAHLSTRÖM, JOAKIM. "Validation of Indirect Tensile Method for Fatigue Test Characterising of Bituminous Mixes". 2<sup>nd</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress, book 1, pp 772-778. Barcelona 2000.
- ERLIGSSON, S. "Stiffness and Fatigue of Asphalt Concrete Estimated with the Indirect Tensile Test". 2<sup>nd</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress, book 1, pp 237-247. Barcelona 2000.
- "Valoración y unificación de los procedimientos y criterios en la ejecución y control de las mezclas bituminosas", Gestió d'Infraestructures S.A., UPC, Barcelona, 1998.
- MARTÍNEZ, ADRIANA. "Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución". Tesis doctoral, UPC, Barcelona.
- KENNEDY, THOMAS. "Characterization of asphalt pavement materials using the indirect tensile test". Asphalt Pavement Technology 1997, Proceedings of Asphalt Paving Technical Sessions, San Antonio, Texas, 1977, Volumen 46, pp. 133-150.
- NLT-346/90: Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas. Cedex.