

IAG163-01-2013
CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL
LIGANTE Y LA RESISTENCIA A DEFORMACIÓN PERMANENTE DE
MEZCLAS
CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E DA
RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Verónica Contreras Ibáñez
Centro de Tecnología Repsol
España
contreras.ibanez.veronica@repsol.com

Francisco Guisado Mateo
Centro de Tecnología Repsol
España
francisco.guisado@repsol.com

Emilio Moreno Martínez
Centro de Tecnología Repsol
España
emorenoma@repsol.com

Antonio Pérez Lepe
Centro de Tecnología Repsol
España
aperezlepe@repsol.com

Resumen

La predicción o co-relación de propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con las propiedades del ligante bituminoso ha sido un tema ampliamente estudiado. En particular, resulta muy interesante estudiar la resistencia de las mezclas a la acumulación de cargas y deformación permanente, evaluando el papel del ligante bituminoso.

La caracterización reológica de los ligantes con el objetivo de resaltar su comportamiento durante la puesta en servicio de la carretera, ha permitido la edición de métodos y normas de ensayo mediante el uso del reómetro de cizalla, a partir de parámetros como la viscosidad a bajas velocidades de cizalla (ZSV), temperaturas de equi-viscosidad (EVT) o porcentaje de recuperación de la deformación en ciclos de creep y recuperación (MSCR). Sin embargo, no hay demasiados estudios que permitan distinguir claramente la contribución de cada parámetro a las propiedades de la mezcla y su resistencia a rutting.

En este trabajo se han caracterizado mezclas, empleando ligantes con distintos niveles de modificación polimérica, con el objetivo de encontrar relaciones entre las propiedades reológicas de dichos ligantes y las propiedades mecánicas de una mezcla densa. Se propone una co-relación

entre los ensayos de pista (WTT), el de compresión cíclica (CCT) y el de creep en las mezclas y de estos a su vez con el ensayo MSCR de los ligantes bituminosos.

Resumo

A previsão ou correlação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com as propriedades do ligante betuminoso têm sido um tema amplamente estudado. Em particular, tornou-se muito interessante estudar a resistência das misturas à acumulação de cargas e deformação permanente, avaliando o papel do ligante betuminoso. A caracterização reológica dos ligantes com o objetivo de destacar o seu comportamento durante a colocação em serviço da estrada, permitiu a edição de métodos e normas de ensaio com recurso ao reómetro de corte, a partir de parâmetros como a viscosidade a baixas velocidades de corte (ZSV), temperaturas de equi-viscosidade (EVT) ou percentagem de recuperação da deformação em ciclos de creep-recovery (fluência e relaxamento) recuperação (MSCR). No entanto, não existem muitos estudos que permitam distinguir claramente a contribuição de cada parâmetro para as propriedades da mistura e a sua resistência às rodadeiras (rutting). Neste trabalho caracterizaram-se as misturas, empregando ligantes com distintos níveis de modificação com polímeros, com o objetivo de encontrar relações entre as propriedades reológicas dos ditos ligantes e as propriedades mecânicas de uma mistura densa. Propõe-se uma correlação entre os ensaios de pista (WTT), de compressão cíclica (CCT) e de creep (fluência) nas misturas, e destes por sua vez com o ensaio MSCR dos ligantes betuminosos.

INTRODUCCIÓN

Los ligantes empleados para el presente estudio son ligantes bituminosos con distinto nivel de modificación polimérica: un betún base de penetración (50/70), un betún modificado con polímero (PMB 45/80-60), un betún modificado de alta viscosidad, con mayor contenido de polímero, (hvPMB 45/80-75) y un betún modificado con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). Se ha llevado a cabo una caracterización reológica de estos cinco ligantes, mediante la construcción de curvas maestras desde barridos de frecuencias a distintas temperaturas, y se han extraído parámetros reológicos de los ligantes a partir de ensayos dinámicos y de *creep* (Zero-Shear Viscosity (prEN 15325), Low-Shear Viscosity (prEN 15324) y MSCR (ASTM D-7405: multiple-step creep&recovery test). Así mismo se obtuvo el grado PG (*performance grade*) de los ligantes, de acuerdo con el programa SUPERPAVE.

Muchos estudios demuestran que el contenido de ligante, la temperatura o el contenido de huecos de la mezcla asfáltica, tienen una gran influencia en su resistencia a las deformaciones permanentes. Por esta razón, se han mantenido, en el presente trabajo, estas condiciones para los cuatro ligantes en mezcla densa AC16. En trabajos posteriores se evaluarán las mezclas discontinuas. Se han llevado a cabo ensayos de pista (EN 12697-22), ensayos de compresión cíclica (EN 12697-25) y ensayos de *creep*, para evaluar la deformación de las mezclas ante las cargas impuestas.

EVALUACIÓN Y RESULTADOS

Evaluación reológica de los ligantes bituminosos.

Respuesta viscoelástica (modo dinámico)

En primer lugar se presentan (tabla 1) las características básicas de los ligantes, según normativa europea. Se ha escogido como referencia un betún modificado con polímero (elastómero) del tipo PMB 45/80-60. Para llevar a cabo el estudio comparativo, se ha escogido un betún base 50/70, un betún modificado (hvPMB 45/80-75) de alta viscosidad y alto nivel de modificación (mayor cantidad de polímero). El betún base, por tanto, no debe entenderse como el betún de partida sobre el que se ha añadido el polímero sino como la respuesta de un ligante alternativo de la misma penetración pero sin modificar. Se ha evaluado un ligante de baja cohesión modificado con caucho NFU, con el fin de evaluar la respuesta elástica y cohesiva de estos ligantes, dada su particularidad. Hay que hacer notar, según los datos de la tabla 1, que la penetración de este ligante (CRMB) es ligeramente inferior a la del resto de ligantes. Se seleccionó de esta forma de acuerdo con una práctica preferente de bajar la penetración del betún-caucho para compensar la rigidez o elasticidad contenida en las partículas, en lugar de en la matriz bituminosa (en el caso de no emplear procesos de alta digestión del caucho). Este ligante sería del tipo 45/80-60, a excepción del parámetro de Energía de Deformación por Fuerza-Ductilidad.

Tabla 1. Propiedades de los ligantes: betún base 50/70, betún modificado con caucho (CRMB), betún modificado (PMB) y betún modificado de alta viscosidad (hvPMB).

Característica	Unidades	Test	50/70	CRMB 45/80-60* Crumb rubber modified binder	PMB 45/80-60	hvPMB 45/80-75
Penetración 25°C	0,1mm	EN 1426	59	50	67	66
Punto de Reblandecimiento	°C	EN 1427	50,2	61,8	62,8	78,2
Fuerza-Ductilidad	J/cm ²	EN 13589	0,24	0,27	7,59	8,3
		EN 13703	a 15°C	a 25°C	a 5°C	a 5°C
Fraass Punto de fragilidad	°C	EN 12593	-11	-16	-17	-22
Recuperación Elástica 25°C (tracción)	%	EN 13398	10	59	88	95
Recuperación Elástica 25°C (torsión)	%	NLT-329	3	25	59	79
Resistencia al envejecimiento						
<i>Cambio de masa</i>	%	EN 12607-1	0,0	0,1	0,0	0,0
<i>Penetración retenida</i>	%	EN 1426	62	66	68	82
<i>Aumento del Punto de Reblandecimiento</i>	°C	EN 1427	7	7,7	4,4	0
Viscosidad Dinámica						
<i>170 °C</i>	<i>mPa.s</i>	<i>EN 13302</i>	<i>107</i>	<i>301</i>	<i>347</i>	<i>805</i>

Los parámetros que más influencia tienen en la resistencia del ligante a *rutting* (a igual penetración) son el punto de reblandecimiento, la cohesión por Fuerza-Ductilidad y la recuperación elástica (Corté et. al.1994). El ligante con mayor grado de modificación es el que mayor elasticidad y cohesión ofrece. El ligante modificado con caucho NFU es el que menor cohesión presenta.

La respuesta viscoelástica de los ligantes fue evaluada mediante ensayos en reómetro de cizalla (DSR). Actualmente, en diferentes laboratorios europeos, se están optimizando protocolos de ensayo (CEN/TS15324 y 15325) para evaluar la respuesta viscoelástica de los betunes mediante

DSR. En concreto, el método propuesto en TS 15324, define una temperatura de equi-viscosidad en la región de baja frecuencia, mediante dos etapas:

Test 1: un barrido ascendente de temperatura 1°C/min, con oscilación a 0,1Hz, para determinar la temperatura (EVT1) a la cual el ligante presenta una viscosidad compleja G^* de 2kPa s, mediante interpolación lineal por regresión.

Test 2: A esta temperatura EVT1, se impone un barrido descendente de frecuencias y se calcula por extrapolación la viscosidad dinámica para una frecuencia tan baja como 0,0001Hz, mediante un segundo ajuste por regresión. Este segundo valor de viscosidad se relaciona con EVT1 mediante la regresión viscosidad-temperatura del test 1, obteniendo una temperatura EVT-2. Cuanto mayor es el nivel de modificación del ligante, mayor es la diferencia (aumento) de EVT2 respecto a EVT1. Hay que hacer notar que el hecho de extrapolar en zona de baja frecuencia es arriesgado y en situaciones de alta modificación y/o modificación con plásticos (en lugar de elastómeros) se recomienda extraer el valor de la pendiente por interpolación en una zona de frecuencia más alta.

Los datos se muestran en la tabla 2. Como referencia, el grado superior del sistema *Superpave PG* ha sido también calculado a partir de ensayos dinámicos en reómetro de cizalla, ya que ambos métodos siguen el mismo principio: encontrar la temperatura para la cual el ligante presenta una viscosidad determinada.

Tabla 2. Temperaturas de equi-viscosidad (EVT) y grado PG para ligantes: betún base 50/70, betún modificado con caucho (CRMB), betún modificado (PMB), betún modificado de alta viscosidad (hvPMB) y betún modificado para mezclas semicalientes

	50/70	CRMB 45/80-60* Crumb rubber modified binder	PMB 45/80- 60	hvPMB 45/80-75
EVT-1	53,1	62,0	60,0	66,0
EVT-2 (0,1-0,0001)log-log	57,3	74,1	77,3	83,8
ΔT	4,2	12,1	17,3	17,8
SHRP PG (upper grade)	70	76	82	88^
$G^*/\text{sen}\delta$ a 1,59Hz	>1,0 kPa			
[Después de RTFOT] $G^*/\text{sen}\delta$ a 1,59Hz	>2,2 kPa			

^PG 88 no definido en SHRP_PG, pero para el ligante hvPMB, 88 sería el grado más apropiado

La respuesta de los fluidos viscoelásticos ante esfuerzos de cizalla está relacionada con la movilidad de las moléculas y elementos de volumen del material. Para materiales compuestos, esta movilidad, caracterizada por el espectro de relajación del material, tiene que ver con la naturaleza de la fase continua, la naturaleza y porcentaje de fase dispersa y las interacciones moleculares. En un ligante modificado con polímeros, la movilidad es pequeña a baja temperatura, pero al calentarse, la movilidad molecular aumenta, dejando al descubierto la respuesta elástica de la fase rica en polímero o de las partículas de caucho presentes en el ligante. La inter-dependencia entre el efecto de la temperatura y el tiempo de respuesta/observación de los materiales ha sido expresada mediante el principio de superposición tiempo-temperatura (Williams, Landel, Ferry, 1955), mediante el cual, se puede obtener, en el caso de fluidos termoreológicamente simples, una curva maestra por superposición de curvas dinámicas a diferentes temperaturas. Para estos fluidos el efecto de aumentar temperatura se corresponde

matemáticamente con un aumento del tiempo de observación, o una bajada de frecuencia de oscilación, y permite observar el espectro del material en 8-10 órdenes de magnitud de frecuencia. Para los cuatro ligantes, se han realizado barridos de frecuencia (0,00147-14,7 Hz) a diferentes temperaturas, 25°C, 40°C, 60°C y 80°C. El módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdidas (G''), y ángulo de desfase (δ), pueden ser desplazados de forma horizontal y vertical sobre el eje de frecuencias mediante un software de cálculo, de forma que puede obtenerse una curva maestra empírica en un rango extendido de frecuencias [10^{-7} - 10^1 Hz] (ver figura 1).

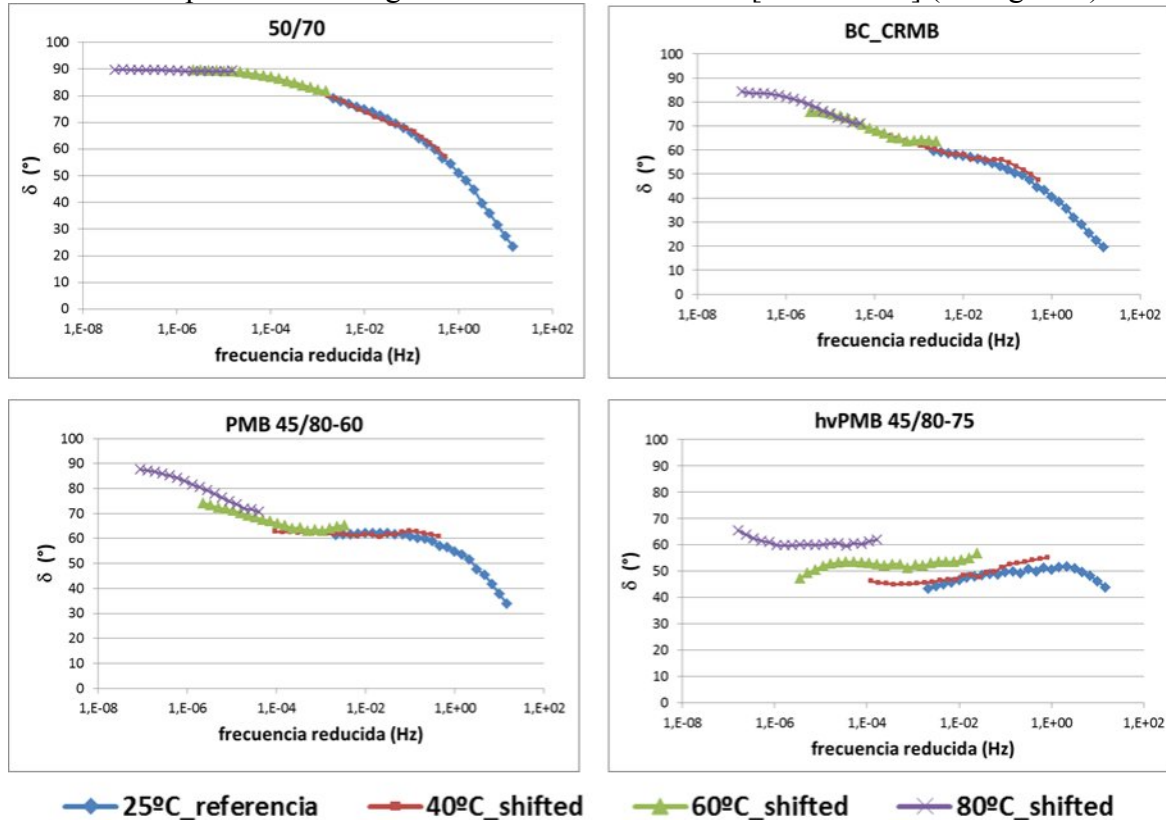


Figura 1. Curvas Maestras del ángulo de desfase, obtenidas mediante WLF-software para los cuatro ligantes a partir de barridos de frecuencia a 25°C (referencia), 40°C, 60°C y 80°C

En la figura 1, pueden observarse las cuatro curvas maestras. Para el betún base, se observa la forma típica de medio arco, con un buen solape entre todas las curvas. En el caso del betún modificado con polímero (PMB), las curvas no solapan del todo y se observa una zona plateau (o mínimo local) a 40-60°C, típica de la modificación con cauchos estireno-butadieno. Este efecto se acentúa en el caso del ligante hvPMB, con curvas paralelas entre sí que dan cuenta de una mayor complejidad estructural del ligante. El caso del betún caucho NFU es intermedio entre el ligante modificado y el betún base.

Comportamiento en fluencia (modo creep)

Otro parámetro importante a la hora de predecir la resistencia a *rutting* del ligante es la viscosidad. Mediante el método TS 15325, se impone un esfuerzo de cizalla (50Pa para betún base y 10Pa para modificados) en modo creep, y la viscosidad a bajas velocidades de cizalla (zero-shear viscosity: ZSV) a 60°C es calculada a partir de la evolución del parámetro

Compliance (capacitancia o cedencia), J (1/Pa), con el tiempo (1h para betún base y 4h para modificados). En modo de *creep*, la *compliance* no recuperable se relaciona inversamente con la viscosidad del fluido en reposo, y por tanto, el significado físico de dicho parámetro es la facilidad del material para fluir. Entonces, para su cálculo, se recogen los valores de *compliance* en los últimos 15 minutos del ensayo y se divide por este tiempo (900s). Los valores se muestran según este método en la tabla 3. Otro método alternativo de medida de viscosidad es el de someter al ligante a un barrido ascendente de velocidades de cizalla, con tiempo suficiente en cada escalón para alcanzar un cuasi-estado estacionario, seleccionando valores de viscosidad a baja cizalla. Se observa que la viscosidad aumenta con el nivel de modificación. En el caso del betún-caucho NFU, la viscosidad es más elevada de lo esperado, debido a una menor penetración.

$$\eta_i = \frac{\Delta t}{\Delta J} \cdot \frac{900}{(J_{end} - J_{15min-before-end})} \quad (1)$$

Tabla 3. Viscosidad a baja cizalla ZSV a 60°C para los cuatro ligantes. Valores de Compliance y de la pendiente (compliance slope) entre los valores de 2000s y 3600s

	50/70	CRMB	PMB	hvpMB
Viscosidad, Pa	698	15252	8489	999900
J_{end} , Compliance (1/Pa)	5,148	1,254	1,952	0,032
Compliance slope 2000-3600s	14,25E-04	3,44E-04	5,37E-04	0,08E-04

Ensayo de creep y recuperación. MSCRT: Multiple-step creep and Recovery test

Es importante para evaluar la resistencia del asfalto a la acumulación de deformaciones en la carretera, evaluar los ligantes en la región de temperatura en torno a los 60°C. Es una región, además, donde la matriz bituminosa reblandece y deja visible el efecto elastomérico del polímero. La componente de energía disipada permanente es la que contribuye a generar roderas en el pavimento. De igual manera se traslada al ligante. Algunos ensayos cíclicos llevados a cabo en mezcla no son capaces a veces de distinguir entre los dos mecanismos presentes en la disipación de energía. Por este motivo, se ha desarrollado en DSR un ensayo de *creep* cíclico (no se trata, por tanto, de un ensayo dinámico), con tiempos de recuperación después de cada ciclo de creep. Mediante este protocolo, la capacidad del ligante para recuperar parte de la energía aplicada en deformarlo es evaluada, de una forma más fiable que en el caso del parámetro Superpave $G^*/\sin\delta$, ya que en el caso de altos módulos, la división por el seno del ángulo de desfase no hace discriminar en modo suficiente la elasticidad de los ligantes.

Protocolo de ensayo: se aplica a 60°C un esfuerzo de 100Pa durante 1s, seguido de un período de 9s de reposo (0Pa). Se realizan 10 ciclos, y seguidamente se aplican otros 10 ciclos, con condiciones de *creep* de 3200Pa. Este método se ha adaptado desde el protocolo expuesto en la norma ASTM D-7405.

Se ha aplicado el protocolo para los cuatro ligantes, registrando la evolución de la deformación. En el caso de betún base, se obtienen valores altos de deformación, la mayor parte de la cual se pierde durante los períodos de recuperación. En el caso de betunes modificados, la deformación no es tan alta y parte de la misma se recupera, con un efecto más patente en el caso de alta modificación (hvpMB).

De ambas secuencias (100Pa y 3200Pa) se han extraído los valores de deformación inicial ε_0 y final ε_c del ciclo de creep (ε_1 es la diferencia de ambos valores). ε_r es la deformación al final del ciclo de recuperación, siendo ε_{10} la diferencia entre ε_r y ε_0 . Un valor promedio de porcentaje de recuperación RE, puede ser calculado de la siguiente forma:

$$RE = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) * 100}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

De igual forma se puede obtener el valor de *compliance* no recuperable, J_{nr} , dividiendo el valor de ε_{10} por el esfuerzo del ciclo de *creep*. J_{nr} es el parámetro que se relaciona de manera conceptual con el potencial a roderas, mientras que RE proporciona un indicativo de la respuesta elástica del ligante. A partir de estos dos valores del ensayo MSCR, se puede inferir la respuesta del ligante en cuanto a recuperación elástica y a tenacidad-cohesión.

Se presentan los datos en la tabla 4, de porcentajes de recuperación de la deformación RE, así como los valores de recuperación elástica por torsión, a partir de ensayo NLT-329. Los valores obtenidos por MSCR sufren cierta variación, como se ha visto, cuando se cambian los valores del esfuerzo aplicado, pero también cuando se cambia la duración de cada ciclo. El método tradicional para extraer esta información podría ser un protocolo de creep y recuperación, pero en lugar de hacerse de manera cíclica con intervalos muy cortos, realizar un solo segmento de creep durante unos 15 minutos, seguido de un período de recuperación (45 minutos o hasta estado estacionario), sin embargo, se pretende observar la respuesta del material ante el paso de rueda (tiempos cortos), con el fin de relacionar estos parámetros del ligante con el comportamiento de las mezclas. A pesar de esta discrepancia en la duración, se ha obtenido una buena correlación entre los datos de recuperación por MSCR y el ensayo por torsión NLT (que al fin y al cabo, es un ensayo de creep-recuperación).

Tabla 4. Recuperación elástica de los ligantes a partir de ensayos NLT de torsión y a partir de ensayos MSCR.

	50/70	CRMB	PMB	hvPMB
Recuperación elástica (torsión), %	3	25	59	79
MSCR RE, %	2	38	69	89

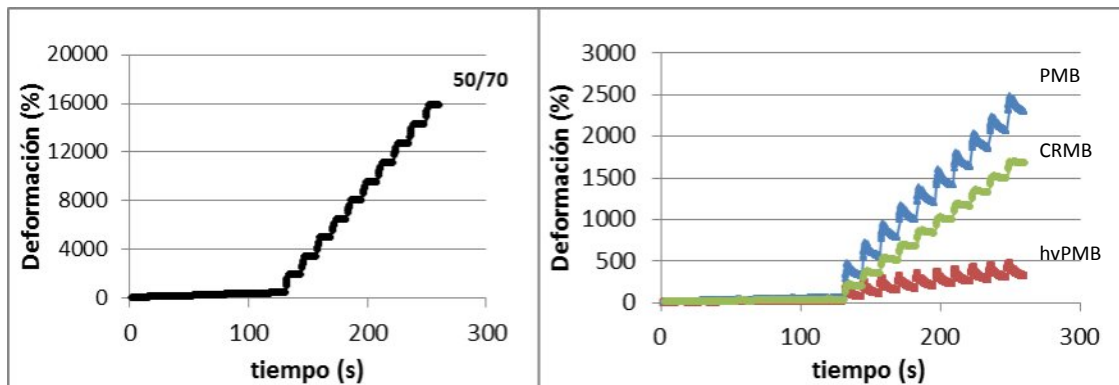


Figura 2. Ensayos MSCR: Multiple-step Creep and Recovery, para el betún base (izquierda) y los 3 betunes modificados (derecha). Porcentaje de deformación (shear strain) versus tiempo (s).

Evaluación reológica de las mezclas bituminosas

Se ha seleccionado una mezcla densa AC16 para la evaluación de los ligantes anteriores. Se han utilizado áridos sílico-calcareos del área de Madrid, con la siguiente granulometría (5,2% de ligante sobre árido):

Tabla 5.- Granulometría de los áridos.

Tamiz, mm	% pasa	AC16D	Contenido en ligante
22	100	100	5,20% sobre árido
16	100	90-100	
8	73	64-79	
4	54	44-59	
2	39	31-46	
0,5	21	16-27	
0,25	15	11-20	
0,063	6,0	4-8	

Ensayos de Pista de laboratorio (Wheel tracking) EN 12697-22

Se ha realizado este protocolo (EN 12697-22) a 60°C sobre las cuatro mezclas. Se han extraído los valores de los parámetros siguientes (tabla 6): Pendiente de deformación en pista WTS_{AIR} (wheel-tracking slope), Profundidad de la rodera a los 10000 ciclos RD_{AIR}, y Porcentaje de la Profundidad de la rodera a los 10000 ciclos PRD_{AIR}.

Tabla 6.- Ensayo de rodadura EN 12697-22 para las cuatro mezclas

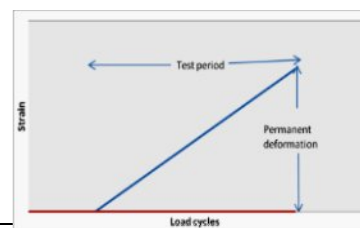
Procedimiento	Dispositivo pequeño. Procedimiento B, en aire, 60°C, 10000 ciclos			
	50/70	CRMB	PMB	hvPMB
WTS _{AIR}	0,255 mm/10 ³ ciclos	0,068 mm/10 ³ ciclos	0,035 mm/10 ³ ciclos	0,022 mm/10 ³ ciclos
RD _{AIR} 10000 ciclos	4,436 mm	2,519 mm	1,571 mm	1,165 mm
PRD _{AIR} 10000 ciclos	10,99 %	5,038 %	3,914 %	2,608 %

Ensayos de compresión cíclica

Las probetas de laboratorio se compactaron con compactador giratorio y se aplicó la norma EN 12697-25 (tabla 7). La carga es aplicada en escalones (1 segundo de carga y 1 segundo de recuperación), durante 3600 ciclos, a 60°C. El máximo esfuerzo axial es de 100kPa. La mezcla con betún sin modificar no pudo concluir el ensayo por rotura de probetas.

Tabla 7- Condiciones de ensayo y resultados (deformación al ciclo 2000 y 3600) para las cuatro mezclas.

Método de preparación de las probetas	compactador giratorio, EN 12697-31
Temperatura de ensayo	60°C
Acondicionamiento	10kPa (600s)
Esfuerzo	100kPa
Número de ciclos	3600



	50/70	CRMB	PMB	hvPMB
Deformación 3600 ciclos, microstrain	>40.000	11709	4417	3092
Deformación 2000 ciclos, microstrain	35427	9479	3874	2837
ciclo 400-1000, microstrain/ciclos	10,40	2,84	1,06	0,65

ciclo 2000-3600, microstrain/ciclos	rotura	1,39	0,34	0,16
-------------------------------------	--------	------	------	------

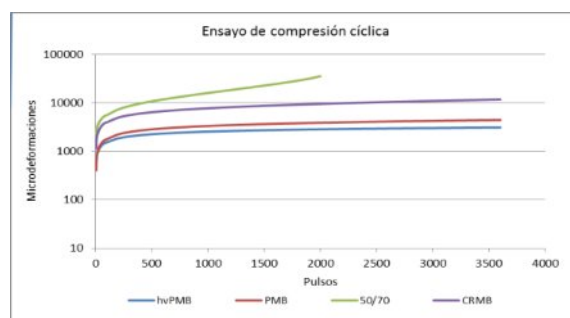


Figura 3. Curvas del ensayo de compresión cíclica (microdeformación vs. número de pulsos).

Ensayos de creep

Los ensayos de creep se llevaron a cabo a 60°C, sin confinar las probetas, que fueron compactadas con compactador giratorio. La carga de creep de 100kPa fue aplicada durante 3600s, seguido de un período de 900s de relajación. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8- Condiciones de ensayo y resultados (máxima deformación a 3600s, pendiente de la curva entre 2000 y 3600s) del ensayo de creep para las cuatro mezclas.

Método de preparación de las probetas	Compactador giratorio, EN 12697-31			
Temperatura de ensayo	60°C			
Acondicionamiento	10kPa (600s)			
Esfuerzo	100kPa			
Tiempo de creep	3600 s			
Tiempo de recuperación	900 s			
	50/70	CRMB	PMB	hvPMB
Max. Deformación 3600 s, %	0,362	0,3	0,213	0,187
Pendiente 2000-3600 s	0,367	0,304	0,136	0,067

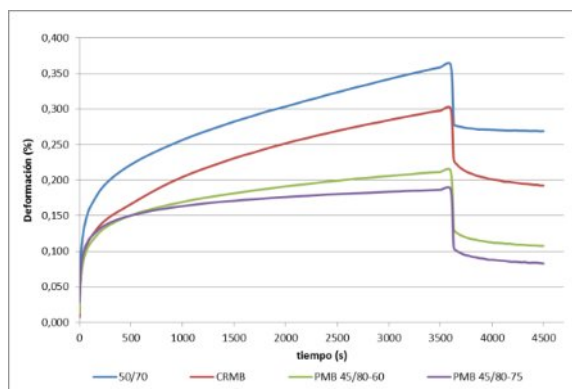


Figura 4. Curvas del ensayo de creep (evolución del porcentaje de la deformación con el tiempo) para las cuatro mezclas.

Correlación de parámetros ligante mezcla

Relación entre el ensayo de rodadura y el de compresión cíclica en mezclas

Ambos ensayos miden la resistencia de las mezclas ante las deformaciones permanentes con condiciones de carga distintas. Para el caso de mezcla con betún base no ha sido posible concluir el ensayo de compresión cíclica, por lo que se han tomado a efectos comparativos las pendientes en dos segmentos: 400/1000 ciclos (donde la probeta aún no ha roto) y 2000/3600. Las deformaciones se han comparado en dos puntos, 2000 y 4600 ciclos. Los resultados se muestran en la figura 8, donde se han representado los valores de las pendientes (Slope) frente al parámetro WTS (pendiente de deformación en pista) y la profundidad de rodadura frente a la deformación. La pendiente del ensayo de compresión y la pendiente del ensayo de rodadura (figura 5, izquierda), así como la profundidad de rodadura del WTT y la deformación del CCT (figura 5, derecha) pueden ser correlacionadas, como puede observarse, incluso con ensayos que demandan la carga de manera diferente.

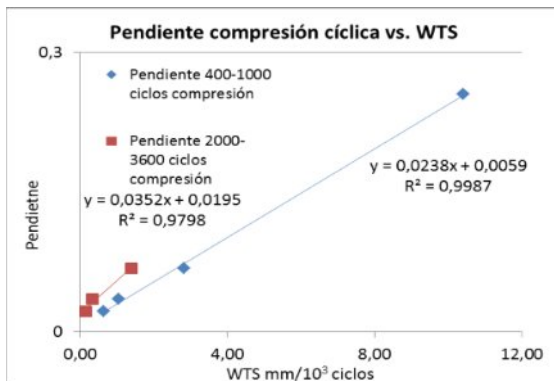


Figura 5a Relación entre la pendiente del ensayo de compresión cíclica (CCT) y ensayo de rodadura (WTT) .

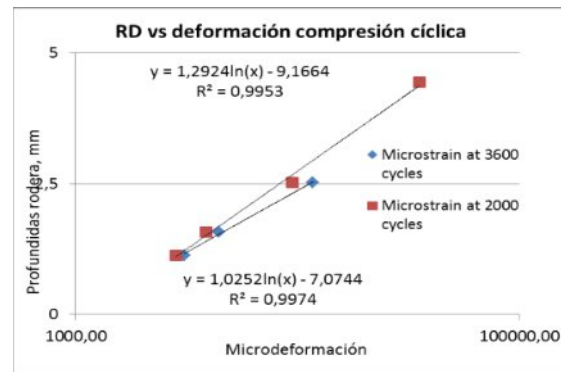


Figura 5b Relación entre la profundidad de la rodadura del ensayo de rodadura(WTT)y ensayo de compresión cíclica (CCT)

Relación entre el ensayo de rodadura, el de compresión cíclica y el ensayo de creep en mezclas

Los tres ensayos miden la deformación permanente en las mezclas, si bien WTT y CCT aplican una carga cíclica, mientras el ensayo de creep aplica una carga mantenida en el tiempo. En la figura 6 se representan 3 gráficas donde se relacionan varios parámetros: la profundidad de rodadura WTT frente al porcentaje de deformación de ensayo de creep, la deformación de creep frente a la deformación de CCT, pendiente de deformación WTT frente a pendiente de CCT y frente a pendiente en ensayo de creep. Existe una correlación lineal entre las deformaciones permanentes de los 3 ensayos, sin embargo, la variación de la deformación, es decir, las pendientes no pueden ser correlacionadas.

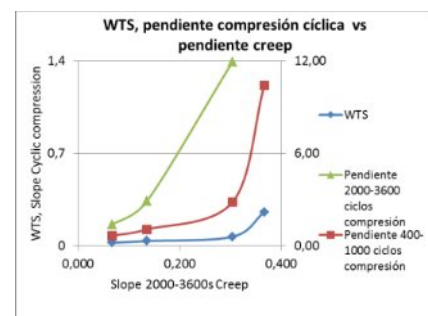
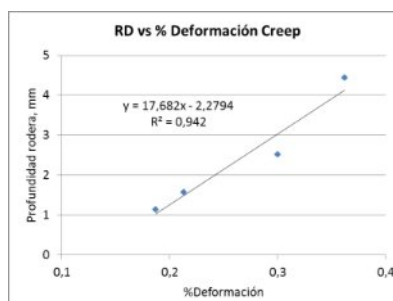
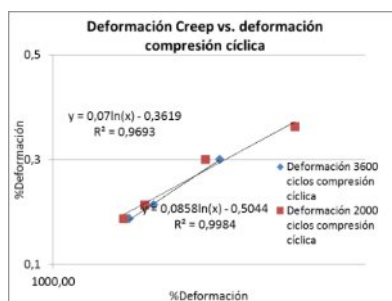


Figura 6a. Relación entre %deformación del ensayo creep de mezcla y de compresión cíclica

Figura 6b. Relación entre profundidad rodera del ensayo de rodadura y %deformación del ensayo creep de mezcla

Figura 6c. Relación pendientes ensayo de rodadura, compresión cíclica y ensayo de creep en mezclas.

Relación entre el ensayo de rodadura, el de compresión cíclica y el ensayo de creep en mezclas y el ensayo de creep del ligante (ZSV)

Los resultados indican que existe cierta linealidad tanto entre los valores de deformación de los tres ensayos de mezcla respecto a la deformación alcanzada en ensayos de creep en DSR del ligante, como entre los valores de las pendientes de mezcla y ligante, a excepción del caso de betún-caucho NFU (figura 7). Sin embargo, se considera que la población de datos es insuficiente para establecer una correlación.

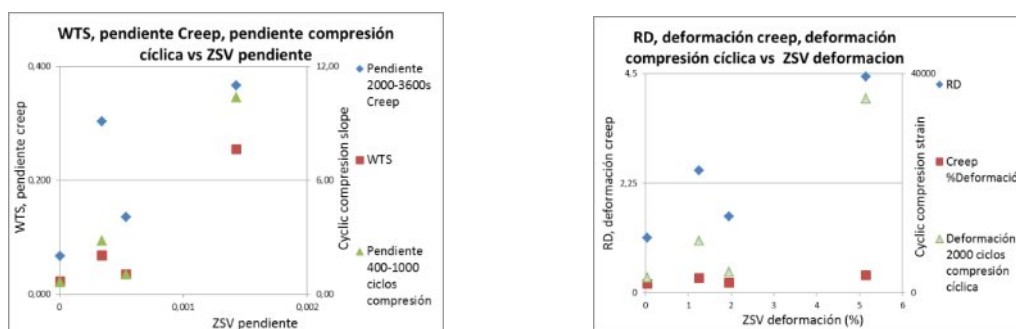


Figura 7. Relaciones entre ensayo de rodadura, compresión cíclica, ensayo de creep en mezclas y ensayo de creep en ligantes.

Relaciones entre ensayos de creep en mezcla y ensayo MSCR en ligante

Se ha encontrado una buena correlación lineal entre los valores de porcentaje de deformación recuperada RE del ensayo MSCR en el ligante y la recuperación elástica de la mezcla en ensayo de *creep*. Además, el parámetro de Profundidad de rodera WTT decrece exponencialmente con la recuperación elástica de la mezcla. Un mayor carácter elástico del ligante proporciona una mejor resistencia a roderas. Así mismo, la parte no recuperable de la *compliance* del ligante, *Jnr*, puede correlacionarse con la parte no recuperable en el ensayo de *creep* en mezcla, a excepción del caso de betún-caucho NFU. Esto podría explicarse por la menor penetración del ligante, dejando entrever la influencia de la dureza en la huella de rodera. Así, se afirma que la recuperación elástica de los ligantes (tanto por el método MSCR, como del método de torsión NLT) predice de manera correcta la resistencia a roderas de las mezclas densas. (ver tabla 9 y figura 8)

Tabla 9. Propiedades de mezcla: porcentaje de recuperación y compliance no recuperable de ensayo de creep en mezcla, y profundidad de rodera RD del WTT. Propiedades del ligante: porcentaje de recuperación de deformación RE y compliance no recuperable *Jnr*, en ensayo MSCR

	50/70	CRMB	PMB	hvpMB
Creep Test Recuperación %	26,3	37,0	52,7	66,1
Creep Test $J_{nr} \cdot 10^5$, 1/Pa	2,620	1,838	0,943	0,535
RD WTT, mm	4,436	2,519	1,571	1,165
MSCR RE %	2	38	69	89
MSCR $J_{nr}@ 3,2kPa$, 1/Pa	2,078	0,295	0,246	0,053

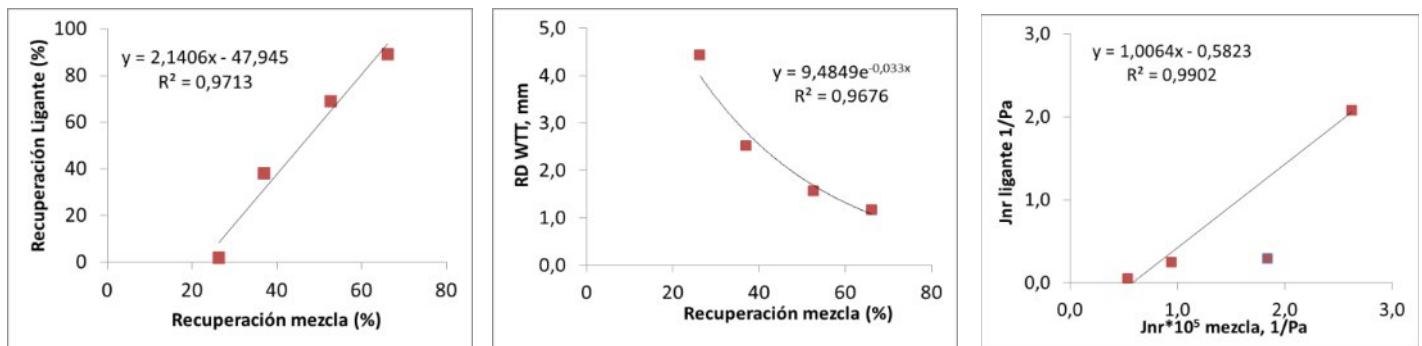


Figura 8. Representación de las propiedades de mezcla: porcentaje de recuperación y compliance no recuperable de ensayo de creep en mezcla, y profundidad de rodadura RD del WTT, y las propiedades del ligante: porcentaje de recuperación de deformación RE y compliance no recuperable Jnr, en ensayo MSCR.

CONCLUSIONES

Bajo estas condiciones de ensayo y tipo de mezcla, se ha encontrado una relación entre los ensayos de rodadura y de compresión cíclica en mezcla densa. Se hace necesario extender la correlación para otro tipo de mezclas.

Aunque el ensayo de rodadura aparece en la especificación actual de mezclas, el ensayo de compresión cíclica podría ser igualmente válido para evaluar la resistencia a deformaciones permanentes, lo que es tremendamente práctico en trabajos de investigación y desarrollo, por la simplicidad del ensayo.

El ensayo de creep también mantiene una buena correlación con estos dos ensayos de mezcla, sin embargo, presenta una gran variabilidad de resultados con el cambio de condiciones, sobre todo en la magnitud del esfuerzo.

De acuerdo con todos los ensayos, se aprecia claramente que los betunes modificados presentan una mejor resistencia a roderas que los betunes convencionales.

Surge una correlación lineal entre los ensayos de deformación de mezclas y ligantes, que deberá ser consolidada con trabajos futuros en diferentes condiciones. Esta correlación es válida para betunes base y betunes modificados con elastómeros, sin embargo, aparece un punto discrepante para el caso de modificación con polvo de neumáticos, posiblemente debida a la propia estructura interna del producto. En dicho ligante, está presente una porción de partículas sólidas elásticas que no están del todo incorporadas a la matriz bituminosa. El efecto en el caso concreto del estudio puede verse agravado por una menor penetración del ligante, lo que contribuye a una mejor resistencia a roderas.

REFERENCIAS

ASTM D-7405, "Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer"

Anderson, D'Angelo y Walker "A better tool for characterizing high temperature performance properties", Asphalt Institute (2010).

Corté J. F. et al (1994). "Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration". Transportation Research Record No. 1436.

D'Angelo y Dongre "Practical use of the MSCR test: characterization of SBS dispersion and other additives in PMA binders" TRB, annual meeting 2009.

EN 12591, "Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens."

EN 12697-25, "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test".

EN 14023, "Bitumen and bituminous binders. Specifications for polymer modified bitumens."

EN 14770 "Bitumen and bituminous binders — Determination of complex shear modulus and phase angle using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)".

Garva y Horvli, "Simplified Testing Method for Evaluation of Asphalt Mixtures for their susceptibility to Permanent Deformation", 2004.

Lesueur D. et al. "Polymer modified asphalts as viscoelastic emulsions" J. Rheol. 42, 1059 (1998).

M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry, J. Amer. Chem. Soc., 77:3701, 1955.

Morea, Agnusdei y Zerbino "The use of asphalt low shear viscosity to predict permanent deformation performance of asphalt concrete", Materials and Structures (2010).

prEN 15324 "Bitumen and bituminous binders — Determination of equivalent temperature based on Low Shear Viscosity using a Dynamic Shear Rheometer in low frequency oscillation mode".

prEN 15325 "Bitumen and bituminous binders — Determination of Zero-Shear Viscosity (ZSV) using a Shear Stress Rheometer in creep mode".