

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

Anna París (Parma Ingeniería)
Jorge J. Romo (EGZ Ingenieros)
Miguel Ángel del Val (Universidad Politécnica de Madrid)

RESUMEN

En 2008-2009 el Ministerio de Fomento llevó a cabo la rehabilitación del firme de la autovía A-5 en la provincia de Cáceres, en el tramo comprendido entre el límite con la provincia de Toledo y Almaraz. La rehabilitación se ejecutó mediante un reciclado en caliente en central con una tasa de fresado del 40 %, de manera que para la reposición de la capa de base se extendió una mezcla bituminosa en caliente del tipo AC 22 base G-R40, cuyo ligante fue un betún con rejuvenecedores diseñado al efecto. Se utilizó para la fabricación de la mezcla una central de tipo discontinuo con una capacidad de 200 t/h.

Los ensayos realizados durante las obras arrojaron unos resultados que cumplían las exigencias de las especificaciones del Proyecto, y el resultado final fue absolutamente satisfactorio. Un año después de la puesta en obra de la mezcla reciclada se ha querido analizar en detalle su comportamiento a través de ensayos sobre testigos extraídos en la campaña que se ha realizado ahora expresamente para ello.

Por un lado se ha pretendido comparar los resultados obtenidos en los testigos de esta campaña con los que se obtuvieron durante la ejecución de las obras. Por otro lado, se ha procedido a comparar el comportamiento de la mezcla reciclada con el de la mezcla convencional colocada en la misma obra.

INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Fomento llevó a cabo durante 2008 y 2009 las obras de rehabilitación del firme en la A-5 (tramo: límite de provincia de Toledo – Almaraz). Su principal

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

particularidad consistía en que se había proyectado la fabricación, transporte, extensión y compactación de 40.000 t de mezcla bituminosa tipo AC 22 base G-R40, fabricada con una tasa de reciclado del 40 % procedente del fresado del firme envejecido de la obra. Esta mezcla bituminosa reciclada se fabricó y extendió durante los meses de octubre y noviembre de 2008.

El control de calidad que se efectuó a la mezcla reciclada fue exhaustivo. Diariamente se llevaban a cabo análisis granulométricos de los materiales fresados y de la mezcla reciclada, así como extracciones de betún en ésta y en aquéllos. También se determinaban diariamente todas las características Marshall de la mezcla fabricada.

Dado la elevada proporción de material fresado y el alto contenido de finos en éste se consideró imprescindible su cribado. Para ello se instaló en la obra una criba móvil con la que se separó dicho material fresado en dos fracciones: 0/7 y 7/25 mm.

La planta asfáltica empleada en la fabricación de la mezcla bituminosa fue discontinua, con una capacidad de 200 t/h. Para el reciclado del material procedente del fresado se le añadieron dos tolvas independientes, un tambor secador paralelo con doble entrada y una tercera unidad con una torre y una tolva para la regulación del material fresado caliente.

CONTROL DE CALIDAD DURANTE LA OBRA

Los controles realizados durante la fabricación de la mezcla reciclada en caliente AC 22 base G-R40 fueron, por un lado, los especificados para la fabricación de un hormigón bituminoso convencional (por tanto, los mismos que se realizaron sobre la mezcla convencional AC 22 base G que se colocó en otros tramos de la misma obra). A esos controles se les añadieron otros enfocados a determinar las características fundamentales del material envejecido cuya regeneración se pretendía con el reciclado. Se puso especial cuidado en el estudio de la fórmula de trabajo con el objetivo de acotar dos variables fundamentales: el estado real del betún envejecido y las propiedades de los áridos contenidos en el material fresado. Como paso previo se estudiaron los distintos tipos de mezclas bituminosas que había en el firme antiguo y se abrieron calicatas para la obtención de muestras de las que se extrajo el betún original para su caracterización.

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

Ensayos previos de las mezclas AC 22 base G-R40 y AC 22 base G

Como resultado final del proceso de formulación se fijó el contenido de ligante de la mezcla AC 22 base G-R40 en el 4,5 % s/a (incluido el procedente del material fresado), con una penetración final de 43. En la mezcla AC 22 base G se fijó un contenido de betún 50/70 del 4,15 % s/a.

Ensayos de control de la producción

Durante la fabricación y la puesta en obra de las mezclas AC 22 base G-R40 y AC 22 base G se llevaron a cabo diariamente los ensayos marcados por el artículo 542 del PG-3, tanto sobre los acopios de áridos como sobre la mezcla fabricada: extracciones de betún, análisis granulométrico de cada muestra y características Marshall (densidad, deformación, estabilidad y huecos); los resultados obtenidos se resumen en las tablas 1, 2 y 3. Así mismo, se realizaron ensayos de resistencia conservada, comprobando que se cumplieran las exigencias especificadas. Sobre los testigos extraídos de la mezcla reciclada se determinó su densidad (tabla 4).

Tabla 1. ANÁLISIS DE MATERIAL FRESADO TRAS SU CRIBADO

PORCENTAJE DE MEZCLA		ÁRIDO 7/22 mm		ÁRIDO 0/7 mm	
ÁRIDO 0/7 mm 40 %	ÁRIDO 7/22 mm 60 %	BETÚN (% s/a)	Pasa # 0,063 (%)	BETÚN (% s/a)	Pasa # 0,063 (%)
Nº ENSAYOS		73	74	73	73
VALORES MEDIOS		3,47	3,6	6,58	7,5
DESVIACIÓN TÍPICA		0,31	0,7	0,83	1,4

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa
tras un año en servicio

Tabla 2. CONTROL DE FABRICACION DE LA MEZCLA AC 22 base G

	Betún (% s/a)	Filler/ betún	DENS. (g/cm ³)	ESTAB. (kN)	DEFORM. (mm)	EST./DEF. (kN/mm)	% Huecos mezcla	% Huecos árido	Pasa # 0,063 (%)
Nº ENSAYOS	26	24	22	23	23	23	23	23	27
VALORES MEDIOS	4,13	1,0	2,35	15,8	2,5	6,4	6,9	16,1	4,0
DESVIACIÓN TÍPICA	0,27	0,17	0,02	1,86	0,33	0,73	1,06	1,03	0,60

Tabla 3. CONTROL DE FABRICACIÓN DE LA MEZCLA AC 22 base G-R40

	Betún (% s/a)	Filler/ betún	DENS. (g/cm ³)	ESTAB. (kN)	DEFORM. (mm)	EST./DEF. (kN/mm)	% Huecos mezcla	% Huecos árido	Pasa # 0,063 (%)
Nº ENSAYOS	68	68	64	64	64	64	63	63	66
VALORES MEDIOS	4,57	1,1	2,36	17,2	2,7	6,5	6,3	15,2	4,8
DESVIACIÓN TÍPICA	0,29	0,17	0,02	1,96	0,33	1,18	0,82	0,69	0,37

Tabla 4. ENSAYOS SOBRE TESTIGOS DE MEZCLA AC 22 base G-R40

	DENSIDAD MARSHALL (g/cm ³)	DENSIDAD TESTIGOS (g/cm ³)	GRADO DE COMPACTACIÓN (%)
VALORES MEDIOS	2,35	2,31	98,2

Como ensayos complementarios se realizaron extracciones de betún por destilación para posteriormente poder realizar ensayos de caracterización del betún (rejuvenecedor + reciclado) después de fabricada la mezcla AC 22 base G-R40.

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

Asimismo se fabricaron probetas para la realización del ensayo de sensibilidad al agua (resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta) y la determinación del módulo dinámico (Tabla 5).

Tabla 5. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS SOBRE LA MEZCLA AC 22 base G-R40

	LIGANTE RECUPERADO			Resistencia conservada (tracción indirecta) (%)	MÓDULO DINÁMICO (sobre probeta)	
	CONTENIDO (% s/a)	PEN. (10^{-1} mm)	Tª Anillo y bola (°C)		MÓDULO (MPa)	ÁNGULO DE DESFASE (°)
VALORES MEDIOS	4,70	30	66,2	88	8046	14,6

ENSAYOS REALIZADOS UN AÑO DESPUÉS DE LA PUESTA EN SERVICIO

Tras un año de servicio de la carretera se ha realizado una primera campaña de extracción de testigos (de 100 mm de diámetro) para determinar las resistencias a tracción indirecta de la mezcla AC 22 base G-R40 y de la mezcla AC 22 bin S colocada sobre ella, así como la adherencia entre estas capas y entre la capa intermedia y la de rodadura (mezcla BBTM 11 B). La tracción indirecta (tabla 6 y Fig. 1) se ha determinado, tras el corte del testigo, según la norma UNE-EN 12697-23; para la adherencia entre capas se ha realizado el ensayo de corte con el dispositivo B, que es el segundo de los dos recogidos en la Norma NLT-382/08 (tabla 7 y Fig. 2).

Tabla 6. RESISTENCIAS A TRACCIÓN INDIRECTA SOBRE TESTIGOS TRAS UN AÑO

	Testigo 1-2		Testigo 1-5		Testigo 1-10	
	AC22baseG-R40	AC22binS	AC22baseG-R40	AC22binS	AC22baseG-R40	AC22binS
Res. a tracción indirecta (N/mm^2)	1,69	1,85	1,11	1,31	1,03	1,59

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio



Fig. 1 Testigo roto a tracción indirecta

Tabla 7. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE (DISPOSITIVO B)

ADHERENCIA ENTRE CAPAS	Testigo 1-6		Testigo 1-7		Testigo 1-8	
	BBTM11B/ AC22binS	AC22binS/ AC22baseG-R40	BBTM11B/ AC22binS	AC22binS/AC 22baseG-R40	BBTM11B/ AC22binS	AC22binS/ AC22baseG-R40
Tensión de corte (N/mm ²)	0,96	0,69	0,90	0,48	0,89	0,82



Fig. 2 Ensayo de corte (dispositivo B)

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

Dentro de este proceso de evaluación del firme rehabilitado tras un año de su puesta en servicio se han extraído otros veinte testigos en una segunda campaña (todos ellos también de 100 mm de diámetro) a fin de determinar el módulo de elasticidad del material colocado sobre el firme antiguo; diez de esos testigos se han extraído en las zonas en las que se ha dispuesto como nueva capa de base el hormigón bituminoso convencional (AC 22 base G) y los otros diez en las zonas en las que se ha extendido como capa de base la mezcla bituminosa reciclada (AC 22 base G-R40). La determinación del módulo del material se ha llevado a cabo de acuerdo con la norma de ensayo NLT 349/90 (medida de la respuesta del material en un ensayo dinámico de compresión uniaxial). Dada la forma de realización del ensayo lo que realmente se mide es el módulo del conjunto que forman la capa intermedia y la de base; lejos de representar un inconveniente, de esta manera se puede estimar mejor cuál ha sido la aportación estructural realmente llevada a cabo. Por otro lado, se ha valorado en todos los testigos la adherencia entre los materiales aportados (nuevos o reciclados) y la superficie antigua subyacente mediante la norma de ensayo NLT 382/08 (se mide la fuerza que es necesario aplicar para producir el despegue en un ensayo de corte).

La determinación de los módulos dinámicos y de los correspondientes ángulos de desfase se ha llevado a cabo aplicando la carga a una frecuencia de 10 Hz, a una temperatura de 20 °C y estableciendo en 50 mm la longitud del testigo sobre la que se determina la deformación unitaria. En cuanto al ensayo de corte para la evaluación de la adherencia se ha llevado a cabo a 20 °C y con el dispositivo A, el primero de los dos recogidos en la Norma NLT-382/08 (Fig. 3).



Fig. 3 Dispositivo A para el ensayo de corte

Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año en servicio

Como se puede observar, los resultados obtenidos (tabla 8) en los dos tipos de mezcla son muy similares. Son prácticamente idénticos los referidos a la altura total media de los testigos (rodadura más intermedia más base) y a la fuerza media de corte necesaria para producir el despegue entre las capas que constituyen la rehabilitación y las del firme antiguo. En cuanto a los módulos dinámicos son algo superiores (del orden del 20 % como media) en los testigos con mezcla reciclada (en éstos, correlativamente, los ángulos de desfase son como media del orden de un 10 % más bajos); esta diferencia de valores en los módulos puede tener su origen en la mayor dureza y consistencia del betún final resultante en la capa reciclada. En todas las magnitudes medidas las correspondientes desviaciones típicas son parecidas en uno y otro grupo de testigos (de las diferencias que se observan no caber sacar ninguna conclusión estadísticamente consistente).

Los valores de los módulos, tanto en el caso de la mezcla reciclada como en el de la mezcla convencional, son los esperables, por lo que se puede asegurar que el estado estructural tras un año de puesta en servicio es correcto en ambos casos. En cuanto a la adherencia entre las capas que constituyen la rehabilitación y las del firme antiguo, la tensión media necesaria para producir el despegue es de $0,56 \text{ N/mm}^2$ en el caso de la mezcla reciclada y de $0,58 \text{ N/mm}^2$ en el caso de la mezcla convencional: son valores algo bajos, menores lógicamente que los de las capas superiores, si bien debe tenerse en cuenta que la interfaz estudiada se corresponde con una superficie deteriorada e incluso algunos testigos se han despegado en el proceso durante su extracción.

Tabla 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA Y DE MEDIDA DE MÓDULOS DINÁMICOS

	T-1 R40	T-2 R40	T-3 R40	T-4 R40	T-5 R40	T-6 R40	T-7 R40	T-8 R40	T-9 R40	T-10 R40	Media	Desv. típica
Altura total del testigo (cm)	12,75	12,20	12,54	14,71	12,21	13,10	12,20	12,60	13,00	14,10	12,94	0,80

Ensayo de corte NLT-382/08

											Media	Desv. típica
Tensión de corte (N/mm ²)	0,39	0,46	0,48	0,89	0,59	*	*	*	*	*	0,56	0,18
Módulo dinámico NLT-349/90											Media	Desv. típica
Módulo dinámico (MPa)	5805,86	5289,97	6392,72	6224,30	4828,32	5820,54	7150,16	8725,56	5624,58	6770,81	6263,28	1046,18
Ángulo de desfase (°)	18,38	20,00	16,98	18,01	20,49	20,21	17,10	18,28	17,18	17,06	18,37	1,32

	T-11 G	T-12 G	T-13 G	T-14 G	T-15 G	T-16 G	T-17 G	T-18 G	T-19 G	T-11 G	Media	Desv. típica
Altura total del testigo (cm)	**	12,74	13,40	12,50	11,38	14,23	**	14,47	11,96	**	12,95	1,06

Ensayo de corte NLT-382/08

											Media	Desv. típica
Tensión de corte (N/mm ²)	*	*	0,61	*	*	0,35	0,77	*	0,60	*	0,58	0,15
Módulo dinámico NLT-349/90											Media	Desv. típica
Módulo dinámico (MPa)	**	6151,78	5950,63	6035,13	5752,15	3005,60	**	4336,90	4975,94	**	5172,59	1074,17
Ángulo de desfase (°)	**	18,21	20,64	20,81	19,18	21,21	**	20,90	21,03	**	20,28	1,05

Observaciones:

- * Capas despegadas
- ** Altura de testigo insuficiente

CONCLUSIONES

Tras los ensayos y pruebas realizadas cabe concluir que los valores obtenidos para la mezcla reciclada AC 22 base G-R40 tras un año en servicio son los esperables y similares a los de la mezcla convencional AC 22 base G. En definitiva, un análisis de los valores obtenidos, sin que se supiera a cuál de las dos mezclas corresponden, no permitiría discernir si se trata de una o de la otra, es decir, la mezcla reciclada tras su puesta en obra y tras un año en servicio es en todo análoga a la mezcla convencional de referencia.

REFERENCIAS

- Blanco, J.M. *et al.*: *Experiencias de reciclado de firmes en la red de carreteras del Estado en Cáceres. Reciente reciclado en caliente en central mediante planta discontinua*, Comunicación 32, IV Jornada nacional ASEFMA, pág. 475-490, Madrid, 2009
- CEDEX.: *Medida de módulos dinámicos de materiales para carreteras*, Norma de ensayo NLT-349/90, 3 pág., Madrid, 1990.
- CEDEX: *Evaluación de la adherencia entre capas de firme mediante ensayo de corte*, Norma de ensayo NLT-382/08, 5 pág., Madrid, 2008.
- Lorenzo, C. *et al.*: *Reciclado en caliente con altas tasas en la provincia de Cáceres*, Comunicación 28, IV Jornada nacional ASEFMA, pág. 411-420, Madrid, 2009

AGRADECIMIENTOS

Los autores dejan constancia de su agradecimiento a quienes de una u otra manera han hecho posible el presente documento:

- Dirección de la obra (Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura): D. José Manuel Blanco Segarra y D. Antonio Cabanillas Canelo.
- Laboratorio de la Unidad de Carreteras de Cáceres del Ministerio de Fomento: D. Juan Luis Rodríguez Pajares.
- Laboratorio de Caminos de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Madrid): D. Julián Romo Écija.