

Estudio de los parámetros que influyen en el fallo estructural de mezclas asfálticas dosificadas con áridos reciclados

I. Perez, M. Toledano, J. Taibo

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidade da Coruña, (La Coruña), España.

J. Gallego

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Madrid, España.

RESUMEN

En este trabajo se determina la resistencia a la deformación plástica y a la fisuración de dos mezclas asfálticas bituminosas en caliente (MBC) fabricadas con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Las mezclas fabricadas son las S-20 y G-20, denominadas semidensa y gruesa, respectivamente. De este estudio se deduce que las muestras dosificadas con áridos reciclados son más resistentes a las deformaciones plásticas, son más rígidas. Desde el punto de vista del comportamiento a fatiga, son las que presentan menor vida a fatiga para una amplitud de deformación dada. Finalmente, mediante un modelo multicapa elástico-lineal se determinó la variación de la vida útil de una sección de firme destinada a carreteras de bajo tráfico, cuando se incorporan capas que contienen áridos reciclados. Como resultado, se comprueba que el número de ciclos que la sección resiste es superior al número de ciclos previstos.

1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas bituminosas (MB) son utilizadas en firmes flexibles y semiflexibles como capas intermedias y de base respectivamente, estando sometidas a cargas de corta duración cada vez que pasa un vehículo. En estas condiciones de trabajo el fallo estructural de las MB, que pondrá límite a la vida en servicio del pavimento, se produce fundamentalmente por la pérdida de rigidez que puede tener su origen en el aumento de la deformación plástica en la parte superior de las capas (Nienelt G, et al. 1998) o bien por la propagación de fisuras subcríticas de fatiga en la fibra inferior (Di Genedetto et al. 2003).

Por otra parte, desde las administraciones públicas se está potenciando el empleo de residuos de construcción y demolición, debido al agotamiento de los recursos naturales y la excesiva acumulación de estos residuos. En la construcción de carreteras es tradicional el empleo de materiales de desecho en terraplenes, explanadas y capas inferiores del firme, debido a que las prescripciones técnicas imponen menos restricciones en su composición y comportamiento estructural. En cambio, el uso de materiales reciclados en capas superiores del firme requiere de un trabajo de investigación adicional que garantice la funcionalidad de las mezclas bituminosas. En la última década la mayor parte de la bibliografía científica relativa a la fabricación y

caracterización de MB con materiales reciclados, se centran en la reutilización de áridos procedentes del fresado de capas de firme de carreteras, siendo todavía muy escasa y reciente la investigación sobre MBC dosificadas con RCD (Der-Hsien S. et al., 2004). En este trabajo se aborda el estudio de dos mezclas bituminosas en caliente (MBC) de amplio uso en la construcción de firmes en España. Las mezclas seleccionadas son la semidensa, S-20 utilizada para capas intermedias y la gruesa, G-20, para capas de base. Para cada una de estas mezclas se realizaron dos dosificaciones; una con 100% de árido de cantera (utilizadas como muestras de control) y otra con una proporción de 50% de árido reciclado (AR) y 50% de árido de cantera (AC) para cada fracción de árido. La investigación se ha centrado en evaluar la influencia de estos RCD en los mecanismos de fallo del firme; las deformaciones excesivas, producidas por acumulación de las deformaciones plásticas en las capas intermedias (S-20) y la fisuración por fatiga de las capas intermedias (S-20) y base (G-20).

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS

2.1. Áridos y betún

Los AR proceden de una planta de reciclado de residuos de construcción y demolición de Madrid. Estos áridos están compuestos en un 72% de hormigón, un 20% es piedra, 6% mezcla asfáltica y 2% cerámico. Los áridos naturales proceden de una cantera de Galicia. El filler que se utilizó fue polvo mineral de cantera para no introducir nuevas variables en el mástico de la mezcla (Dukatz E. et al. 1980). Como ligante se eligió un betún de penetración 60/70, de uso convencional en mezclas bituminosas en caliente.

2.2. Dosificación y propiedades de las mezclas

En total se han realizado cuatro tipos de MBC: (a) semidensa con árido de cantera (S-C), (b) semidensa con árido de cantera y reciclado (S-CR), (c) gruesa con árido de cantera (G-C) y por último, (d) gruesa con árido de cantera y reciclado (G-CR). Mediante el ensayo Marshall se determinó el contenido óptimo de betún (B_o). En la tabla 1 se indica los porcentajes de filler y betún que define el mástico de las mezclas. Las propiedades volumétricas y mecánicas de las probetas Marshall se incluyen en la tabla 2.

Cabe destacar el elevado contenido de betún y de filler empleado en las mezclas con árido reciclado (S-CR y G-CR) con respecto a las mezclas con áridos naturales. En ambos tipos de mezclas la proporción de filler se tuvo que elevar hasta el límite superior del huso granulométrico, para mantener fija la relación filler-betún. Debido a la gran cantidad de poros que presenta el árido reciclado, la superficie específica es elevada, y por lo tanto fue necesario aumentar el contenido de betún para poder conseguir la suficiente cohesión entre los áridos. A pesar de este aumento del contenido de betún en la mezcla, los huecos en mezcla y los huecos en áridos resultaron más altos que los de las mezclas de control, con áridos naturales, y la densidad fue más baja. La estabilidad de las mezclas se incrementó ligeramente con la incorporación de los áridos reciclados y el mayor contenido de filler y betún.

| <i>S-C</i> | <i>S-CR</i> | <i>G-C</i> | <i>G-CR</i> |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| <i>Huso (3-7)</i> | | <i>Huso (2-5)</i> | |

| | | | | |
|--------------------------|-----|------|------|------|
| <i>Filler</i> | 5.5 | 6.5 | 4.25 | 4.75 |
| <i>B_o (%)</i> | 5 | 5.90 | 4.25 | 4.75 |

Tabla 1. Porcentaje de filler y betún de las MBC.

| | <i>S-C</i> | <i>S-CR</i> | <i>G-C</i> | <i>G-CR</i> |
|------------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|
| <i>Huecos en mezcla (%)</i> | 4 | 8 | 8.9 | 11 |
| <i>Huecos en áridos (%)</i> | 15 | 20.2 | 18 | 20.9 |
| <i>Estabilidad (kN)</i> | 10.8 | 12.6 | 11 | 11 |
| <i>Deformación (mm)</i> | 2.6 | 2.9 | 2.8 | 2.5 |
| <i>Densidad (g/cm³)</i> | 2.4 | 2.28 | 2.3 | 2.22 |

Tabla 2. Propiedades de las mezclas para el contenido de betún óptimo.

3. ENSAYOS

3.1. Deformación plástica

El estudio de la resistencia del material a la deformación permanente se realizó mediante el ensayo de pista de laboratorio, con probetas de dimensiones 300x300x50 mm. El ensayo consiste en someter la probeta al paso alternativo de una rueda (21 ciclos/min.) en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida en el punto medio de la longitud muestra. Para no tener en cuenta los efectos de la fabricación de la probeta y los asientos iniciales, la susceptibilidad a la deformación se caracterizó midiendo la velocidad de deformación durante los últimos 315 ciclos de los 2520 ciclos que dura el ensayo. Este ensayo únicamente se realizó en las mezclas utilizadas como capas intermedias (S-C y S-CR) por ser las más susceptibles a las deformaciones permanentes.

3.2. Propagación subcrítica de fisuras

Los ensayos de fatiga se han realizado en flexión en tres puntos sobre probetas en forma de viga prismática de dimensiones 300x50x50mm en control de desplazamiento en una máquina de ensayos universales Instron 8516. La medida de las deformaciones en la fibra inferior de la probeta se realizó mediante un extensómetro dinámico de base de medida 50 mm. El ensayo se considera finalizado cuando el valor de la amplitud cíclica de carga es menor o igual a la mitad de la amplitud cíclica de carga inicial. En ese momento se considera que aparecen las primeras fisuras en la viga. Para cada tipo de mezcla se ensayaron 5 probetas modificando en cada caso la amplitud de desplazamiento entre 80 μm y 350 μm .

Ley de fatiga en deformación

Uno de los objetivos del ensayo dinámico de flexotracción es determinar la resistencia de la mezcla bituminosa al inicio de fisuras. La resistencia al agrietamiento de la mezcla se expresa mediante la ley de fatiga en deformación, que está dada por la relación (2):

$$(2) \varepsilon = KN^B$$

donde N es el número de ciclos hasta rotura para una determinada amplitud de deformación impuesta (2ε). K y B son constantes.

Módulo Dinámico

En el ensayo de fatiga el material es sometido a una onda senoidal de tal forma que la amplitud de deformación impuesta es relativamente baja. En estas condiciones, el comportamiento de las MB inicialmente elastoviscoplastico, pasa a ser viscoelástico lineal y por tanto, es viable mediante este ensayo calcular el módulo dinámico (MD). Se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión (T_c) y la amplitud cíclica de la función deformación (ε_c) y es una medida de la rigidez de la muestra. Los valores de la tensión, y deformación se obtienen de la teoría elástica de resistencia de materiales, según la norma NLT-350.

4. RESULTADOS

Los resultados del ensayo de pista se incluyen en la figura 1, donde se representa la deformación plástica frente al número de ciclos. Estos ensayos se realizaron sobre las mezclas S-C y S-CR en condiciones de temperatura constante de 60°C y para una carga de 0.9 MPa. Comparando estas gráficas, se observa que las dos mezclas presentan la misma deformación permanente a la finalización del ensayo.

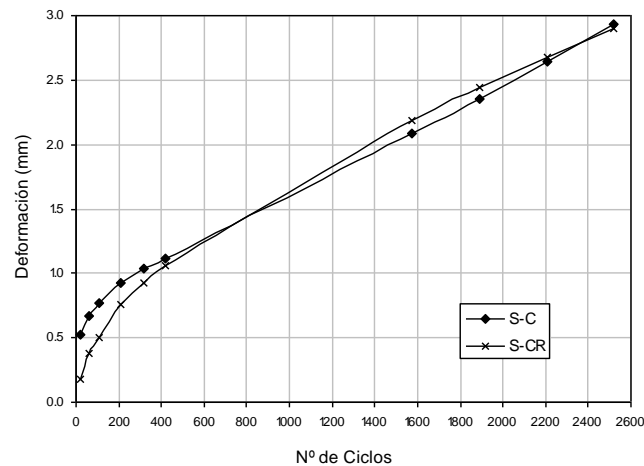


Fig. 1 - Deformación Permanente

En la figura 2 se presentan las curvas de Whöler obtenidas del ensayo de fatiga en condiciones de sollicitación de desplazamiento constante. Las rectas presentadas corresponden al ajuste en escala bilogarítmica de los pares de valores experimentales (semiamplitud de la deformación inicial impuesta, número de ciclos a rotura). Los módulos dinámicos (MD) de cada mezcla se presentan en la tabla 3.

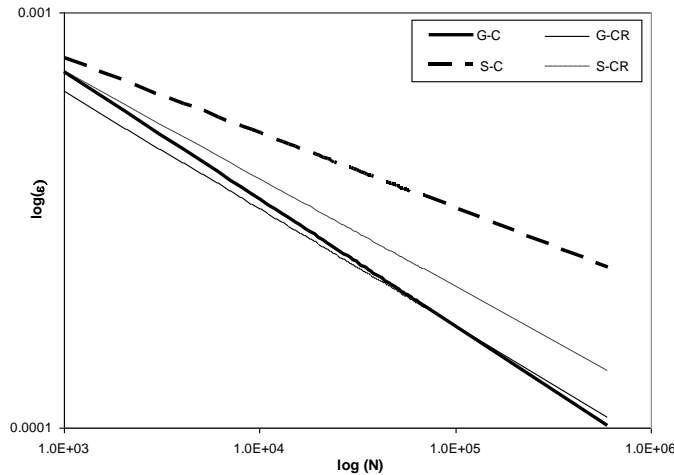


Fig. 2 – Leyes de fatiga en deformación

| | <i>S-C</i> | <i>S-CR</i> | <i>G-C</i> | <i>G-CR</i> |
|-----------------|------------|-------------|------------|-------------|
| MD (MPa) | 3866 | 5016 | 4086 | 4675 |

Tabla 3. Pendiente de la ley de fatiga y módulo dinámico

De los resultados obtenidos para las leyes de fatiga se observa la diferencia de comportamiento entre los diferentes tipos de mezclas semidensa y gruesa. Las leyes de fatiga para la mezcla tipo S-20 quedan por encima de las leyes de la mezcla G-20, esto significa que para una misma deformación impuesta, la mezcla semidensa necesita un mayor número de ciclos de carga para llegar a la rotura.

También cabe destacar que la incorporación de los áridos reciclados fue más adverso (menos resistencia a fatiga) entre las mezclas semidensas S-C y S-CR, que entre las mezclas gruesas G-C y G-CR. La mezcla S-C y la mezcla S-CR presentan un comportamiento a fatiga claramente diferente. La ley de fatiga de la mezcla S-CR está desplazada hacia la izquierda, lo que significa que para una misma deformación impuesta la vida a fatiga de la mezcla S-CR es menor.

En relación a las mezclas gruesas, las dos gráficas están muy próximas, es decir, presentan un comportamiento a fatiga muy similar. La diferencia más importante se produce en el rango de las altas deformaciones y bajo número de ciclos, donde la mezcla G-CR presenta una deformación por fatiga inferior.

Como resultado de la incorporación de los áridos reciclados, los módulos de las mezclas aumentan de manera notable en ambos casos. Y los valores obtenidos concuerdan con lo

esperado, en el sentido de que las mezclas con AR con granulometría S-20 tienen mayor módulo que las mezclas con AR del tipo G-20, debido a su comportamiento más rígido.

5. DISCUSIÓN

En la figura 3 se incluyen los datos de la media de la velocidad de deformación obtenidas en tres intervalos de tiempo sucesivos, y calculados de los datos del ensayo de pista. Este dato es indicativo de la resistencia de la mezcla a la formación de roderas, cuanto menor es la velocidad de deformación mejor es la resistencia a la deformación permanente. La mezcla S-C tiene un comportamiento estable manteniendo los valores de velocidad entorno a 19 $\mu\text{m}/\text{min}$. En cambio para la mezcla S-CR, la velocidad de deformación no se mantiene constante y alcanza valores por debajo de los obtenidos para la mezcla dosificada con áridos de cantera. Esta tendencia indicaría que las mezclas semidensas con áridos reciclados tienen mayor resistencia a las deformaciones permanentes.

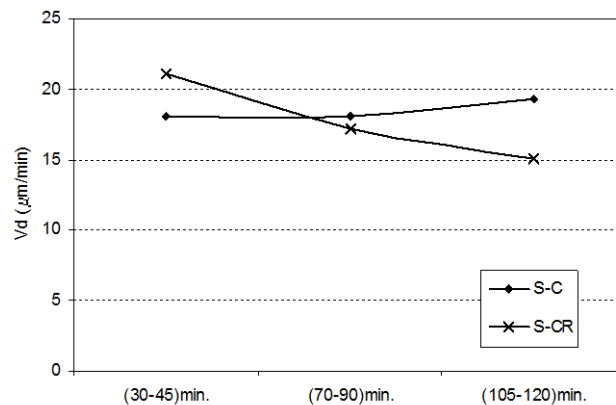


Fig. 3 - Velocidad de deformación permanente.

Los ensayos realizados en fatiga en flexotracción, han permitido constatar que las mezclas que tienen mayor módulo son las que mejor comportamiento tienen en fatiga. Cuanto mayor es el módulo de la mezcla mayor es su vida útil para un desplazamiento impuesto. Finalmente, para determinar influencia del uso de MBC con RCD en la vida útil de firmes de carretera se utilizó un modelo multicapa elástico lineal (Huang Y., 2004). Teniendo en cuenta que los datos obtenidos del ensayo de fatiga en control de desplazamiento se corresponden con pavimentos flexibles de espesores pequeños (Benedetto et al. 1998) se eligió una sección de firme de tráfico bajo T-3211, cuyas características se incluyen en la tabla 4. En esta tabla además se presentan distintas opciones de capas con áridos reciclados.

En la tabla 5 están reflejados los resultados de la vida útil para las secciones de firme consideradas. Se incluyen los valores de la tensión de tracción crítica en la capa de base de mezcla bituminosa, ϵ_t , el número de ejes sencillos que la sección resistirá antes de su

agotamiento (N_a) y el número de ejes sencillos previstos durante una vida útil de 15 años, teniendo en cuenta una tasa de crecimiento anual del tráfico de un 2%, (N_t).

| | | Sección 3211 (IMD_p = 50) | | | |
|-------------------|---------------------|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Capa | Espesor (cm) | Opción 1 C-C | Opción 2 R-R | Opción 3 R-C | Opción 4 C-R |
| <i>Rodadura</i> | 3 | D-12 | | | |
| <i>Intermedia</i> | 7 | S-C | S-CR | S-CR | S-C |
| <i>Base</i> | 8 | G-C | G-CR | G-C | G-CR |
| <i>Subbase</i> | 40 | ZA-25 | | | |
| <i>Explanada</i> | ∞ | EI | | | |

Tabla 4. Secciones estructurales para análisis de vida a fatiga.

| | Sección 3211 (IMD_p = 50) | | | |
|--------------|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Opción 1 C-C | Opción 2 R-R | Opción 3 R-C | Opción 4 C-R |
| ϵ_t | 1.36 | 1.47 | 1.43 | 1.40 |
| N_a | 2.42 | 1.82 | 1.97 | 2.2 |
| N_t | 1.56 | | | |

Tabla 5. Análisis de la respuesta a fatiga.

De esta tabla se deduce que en todos los casos, el número de ejes admisibles (N_a) supera al número de ejes previstos (N_t). Tomando como referencia la opción 1 que se corresponde con el firme diseñado con áridos de cantera, la menor vida del firme se obtendría con la opción 2 que utiliza las dos capas con áridos reciclados. La mejor alternativa para incorporar árido reciclados en la sección del firme, será la opción 4, que tiene una capa base con árido reciclado y la capa intermedia con árido de cantera, consiguiendo de esta manera reducir las deformaciones tangenciales en la capa de base y retrasar la fisuración.

6. CONCLUSIONES

El uso de áridos reciclados mejora la respuesta de las mezclas semidensas a las deformaciones permanentes. Las mezclas S-CR son menos propensas a las deformaciones plásticas.

La vida a fatiga de las MBC gruesas G-20 a penas se modifica con la incorporación de áridos reciclados.

Las MBC semidensas S-20 son más susceptibles a la pérdida de resistencia a fatiga por la incorporación de áridos reciclados.

Los áridos reciclados aumentan la rigidez en las mezclas gruesas como en las semidensas.

Es viable la utilización de MBC con áridos reciclados en secciones de firme diseñadas para tráfico bajos. La mayor durabilidad se obtiene cuando sólo se incorporan áridos reciclados en la capa base

7. BIBLIOGRAFÍA

Nienelt G, Thamfald H. (1988). Evaluation of the resistance to deformation on different road structures and asphalt mixtures determined the pavement rutting tester. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 57, Minneapolis, USA, pp. 320-345.

Di Genedetto, H., de la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A. and Lundstron, R. (2003) Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution. In: Proceedings of the 6th International RILEM Symposium, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, pp. 15-38.

Der-Hsien Shen, Jia-chong Du. (2004). Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation. Construction and building materials, 18, 391-197.

Dukatz, E.L., Anderson, D.A., (1980). The effect of various fillers on the mechanical behaviour of asphalt and asphaltic concrete. Proceedings, AAPT, Minneapolis.

Huang Y. H. (2004) Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall.

Benedetto H. y La Roche C. (1998). State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures. Bituminous Binder and Mixes. RILEM Report 17.