

Actuaciones del Centro de Estudios del Transporte en Marruecos

Performances of Centro de Estudios del Transporte in Morocco

Antonio Sánchez Trujillano^{1*}

Palabras clave

mezcla bituminosa;
deformación plástica;
rodera;
punto de reblandecimiento;
índice de penetración;
punto de fragilidad de Fraass;
anillo-bola;
reómetro de cizallamiento
dinámico;
asfaltenos;
maltenos;
naftenos;
resinas;

Resumen

Las capacidades y la experiencia adquiridas por los centros del CEDEX, y en particular, por el Centro de Estudios del Transporte, en materia de carreteras, permiten transferir conocimientos e intercambiar experiencias con otros entes gestores de las carreteras tanto dentro como fuera de las fronteras españolas.

La dedicación, prácticamente en exclusiva, de los recursos del Centro de Estudios del Transporte a las necesidades de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento hace que la experiencia de éste en el exterior no sea tan relevante como la de otros centros del CEDEX que han seguido, por diversos motivos, otras trayectorias.

Sin embargo, la experiencia española en el ámbito de las carreteras, considerando el patrimonio viario con el que se cuenta y la diversidad de relieves, tipos de suelos, climas, tráfico, etc., es de gran utilidad y susceptible de aplicar con éxito en otros escenarios, tanto nacionales como extranjeros.

En el artículo que figura a continuación se resume un trabajo realizado en Marruecos por el CEDEX, para la entidad Autopistas de Marruecos (ADM), que constituye un ejemplo de intercambio de conocimientos en la caracterización del problema de la presencia de roderas en los firmes de carreteras y en la formulación de soluciones avaladas por la experiencia.

Dicho trabajo quedó recogido en un informe del CEDEX, titulado “Contribution à la compréhension et la maîtrise du problème d’ornierage au Maroc. Informe CEDEX. Abril 2013” y, posteriormente editado en una publicación de ADM, de título “Chaussée guérir de l’ornierage. Autoroutes du Maroc”. La circunstancia de haber adquirido este trabajo una general difusión a través de la citada publicación ha permitido redactar este artículo cuyo objeto es describir la colaboración llevada a cabo con ADM más que detallar la magnitud, la ubicación u otros detalles de las roderas surgidas en algunos tramos de la red de autopistas de dicho país.

Keywords

bituminous mix;
plastic deformation;
rut;
point of softening;
rate of penetration;
point of fragility of Fraass;
anillo-bola;
dynamic shear rheometer;
asphaltenes;
maltenes;
naphthenes;
resins;

Abstract

Capabilities and the experience acquired by CEDEX centers, and in particular, by the Center of Studies of the Transport, in roads, allow transfer knowledge and share experiences with other management bodies of roads inside and outside Spanish borders.

Dedication, almost in exclusive, of the Center of Studies of the Transport resources to the needs of the General Direction of Roads of the Ministry of Public Works makes this experience abroad not as relevant as the other centers of CEDEX who have followed, for various reasons, other paths.

However, the Spanish experience in the field of roads, whereas road heritage which is counted and the diversity of reliefs, types of soils, climate, traffic, etc., is very useful and can be successfully applied in other places, national and foreign.

The article contained below summarizes a work carried out in Morocco by CEDEX, for the entity Motorways of Morocco (ADM), which is an example of knowledge sharing in the characterization of the problem of the presence of ruts in the roads and the formulation of solutions which are guaranteed by the experience.

This work was collected in a report of CEDEX, entitled “Contribution à la compréhension et la maîtrise du problème d’ornierage au Maroc. Report CEDEX. April 2013”, and subsequently published in a publication by ADM, title “Chaussée guérir de l’ornierage. Autoroutes du Maroc”. The circumstance of having acquired this work a general diffusion through this publication has allowed to write this article which aims to describe the collaboration undertaken with ADM rather than detail the magnitude, location or other details of the ruts that have arisen in some stretches of the network of motorways of that country.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Estudios del Transporte, como órgano del CEDEX, ha centrado tradicionalmente sus actividades

en el ámbito del transporte, y más concretamente, en el de la carretera y, salvo algunos trabajos para el Ministerio de Medio Ambiente, ha dedicado la práctica totalidad de sus efectivos y medios a atender requerimientos de asistencia técnica y experimentación formulados por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España.

* Autor de contacto: antonio.sanchez@cedex.es

¹ Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, Madrid, España.

En esas circunstancias, sus efectivos, sus capacidades y su experiencia se han orientado preferentemente a dar respuesta a las demandas de la Dirección General de Carreteras, que han servido de apoyo y de base para la redacción de normativa u otros fines análogos vinculados prácticamente en exclusiva con las necesidades de ésta.

No obstante, la experiencia y la formación adquiridas son susceptibles de aplicar en otros ámbitos, tanto del Estado español como extranjeros, lo que ha dado lugar a la realización de algunos trabajos de asesoramiento a Administraciones extranjeras, como es el caso del trabajo realizado para Autopistas de Marruecos (ADM), sobre el que se centra el presente artículo, por ser la actuación más representativa realizada en el exterior por el Centro de Estudios del Transporte en los últimos años.

2. ANTECEDENTES

El Reino de Marruecos cuenta con una red de autopistas, construidas en tiempos relativamente recientes, que conectan entre sí las grandes ciudades y vertebran satisfactoriamente el territorio y su actividad. No obstante, se han detectado determinados problemas en los firmes de esta red que aconsejan intervenir, para conocer su origen y someter a revisión la metodología empleada para su dimensionamiento y prevenir la presencia de estas anomalías.

En efecto, a diferencia de otro tipo de estructuras, las carreteras y su comportamiento vienen influidas de manera determinante por diversos tipos de fenómenos, tales como la forma en que se aplican las cargas, las condiciones climáticas, etc.

Esto motiva que para identificar y corregir los problemas detectados así como para prevenir su aparición en futuras actuaciones sea preciso un conocimiento profundo de la manera en que actúa cada uno de estos fenómenos y de las relaciones entre ellos, lo que, para el caso de las roderas, constituye el objeto del presente trabajo.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La red de autopistas de Marruecos es una red en la que han surgido problemas de aparición de roderas en algunos tramos puntuales en tiempos relativamente cercanos al inicio de su puesta en funcionamiento, lo que ha motivado una preocupación en los gestores de estas vías así como un lógico interés por conocer los motivos de tales anomalías, con objeto de arbitrar soluciones para solventarlas. Con tal motivo, los responsables de la gestión de la citada red se pusieron en contacto con el CEDEX, para solicitar el estudio, en colaboración, del posible motivo de tales anomalías e intercambiar experiencias acerca del origen del fenómeno y de las maneras de resolverlo, habida cuenta de la experiencia de la Administración española en este campo.

Para evaluar la magnitud del problema de roderas en las autopistas de Marruecos se seleccionaron, en una visita efectuada conjuntamente por ADM y el CEDEX, tres secciones representativas en las que podían apreciarse estos deterioros.

Para su elección y con el fin de que los tramos estudiados fueran representativos y las conclusiones del estudio fueran, en principio, susceptibles de generalización a la totalidad de la red, se consideraron aspectos relacionados

con el tipo de firme y la intensidad y características del tráfico que transita por ellas, con especial énfasis en el tráfico pesado.

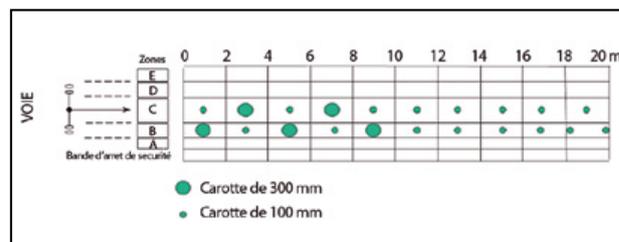
Se consideró también el clima, particularmente el régimen de temperaturas a las que estaban sometidas, si bien, en ese sentido las tres secciones seleccionadas para el estudio respondían a un mismo tipo de clima, denominado semihúmedo, en la terminología local.

Como referencia se seleccionaron otras tres secciones que contando con idéntica estructura en cuanto a tipo de firme, proceso de construcción y características del tráfico, no se les apreciaban problemas de roderas.

Por razones de confidencialidad así como por el hecho de que las descripciones y métodos de trabajo que se exponen en este artículo no variarían respecto a cualquier otro caso análogo, se omite identificar las autopistas y puntos kilométricos concretos en los que se tomaron las muestras así como la magnitud de las roderas que se habían producido en ellas.

Con el fin de diagnosticar las causas que habían producido las roderas, en estas secciones se efectuó **una inspección visual y se extrajeron testigos del pavimento para determinar las características tanto de las mezclas bituminosas como de los ligantes** y áridos recuperados a partir de ellas. Para ello, técnicos del CEDEX se desplazaron a Marruecos para hacer una inspección visual en las secciones indicadas y confirmar su representatividad para los fines del estudio.

A su vez, ADM se comprometió a extraer los testigos, de 100 y 300mm, necesarios para facilitar al CEDEX las muestras que debían analizarse en el laboratorio. La toma de muestras se dispuso según el esquema que se indica a continuación:



Selección de puntos de la calzada para extracción de muestras.

Como puede apreciarse, por la situación de los puntos de muestreo seleccionados, con independencia de la separación entre ellos en el sentido longitudinal de las vías, en el sentido transversal se seleccionaron puntos situados tanto en la zona de paso de las ruedas de los vehículos como en el centro del carril, con el fin de disponer de pares de muestras, exactamente iguales en cuanto a su construcción pero notablemente diferentes en cuanto a las cargas que soportan, pues la que se encuentra en el centro de la rodada recibe la totalidad de las cargas del tráfico circulante por la vía mientras que la situada en el centro del carril se puede admitir que es ajena a dichas cargas.

4. ENCUADRE METODOLÓGICO DEL TRABAJO

Como queda enunciado anteriormente, aparte de otros factores que también podrían tener una cierta influencia en el fenómeno de las roderas, la aparición de éstas tiene su

origen en la presencia, con mayor o menor intensidad, de uno o varios de los siguientes factores:

- las características del trazado, en alzado y planta, y la estructura del firme
- las características del suelo y la explanada
- las características del tráfico
- las condiciones climáticas.

Teniendo en cuenta que las condiciones climáticas eran similares en todas las carreteras objeto de este estudio se decidió obviar este factor, de tal manera que se centró en la caracterización estructural del firme y del tráfico, considerando la posibilidad de que, a su vez, las circunstancias climáticas podrían influir en el comportamiento de los firmes, es decir, que en el dimensionamiento de estos fuera determinante el conocimiento del clima, particularmente, de las temperaturas máximas, en cuyo caso procedería abordar ensayos consistentes en establecer los tipos, las dosificaciones, dimensionamiento y demás características de ejecución de los firmes en función del clima.

Se centraron los estudios en el conocimiento de la normativa empleada en el dimensionamiento de los firmes y en la caracterización del tráfico, particularmente, del tráfico pesado.

4.1. Estudio de la normativa aplicada al dimensionamiento de los firmes.

Se analizó en profundidad la normativa de dimensionamiento de firmes y su interpretación, para diagnosticar los contenidos concretos en los que pueden tener origen las deficiencias detectadas, con el fin de articular las soluciones pertinentes.

Resulta importante resaltar acerca de esto que la experiencia española es particularmente valiosa por cuanto que problemas de esta naturaleza también se han producido en las redes de carreteras, tanto del Estado como de las Comunidades Autónomas, y se les han dado soluciones satisfactorias, por lo que se estimó que no tanto las soluciones concretas sino los procesos para llegar a ellas guardarán cierta semejanza metodológica con los que en su momento se instrumentaron para resolver el caso español.

4.2. Caracterización del tráfico

Es primordial el conocimiento del tráfico que transita por las autopistas objeto de este estudio, tanto en su intensidad y distribución como en lo referente a la magnitud de las cargas que transmiten al firme, por lo que el conocimiento y la sistematización de esta información constituye un primer paso obligado para el desarrollo de las restantes tareas del trabajo.

Se previó en este sentido proyectar un sistema de pesaje del tráfico, para su aplicación especialmente en el conocimiento de las grandes cargas que circulan por las mencionadas autopistas, basado en las nuevas técnicas de pesaje dinámico, que permiten disponer de esta información con precisión suficiente y sin necesidad de detener los vehículos. Incluso, estos modernos sistemas permiten remitir la información por vía telemática a un centro receptor situado a cualquier distancia del punto de instalación del

sistema de pesaje, lo que facilita notablemente los trabajos de campo correspondientes y el procesado de la información obtenida, por cuanto que no requieren desplazar especialistas al punto donde se genera la información.

5. PLAN DE TRABAJO

Las roderas son deformaciones permanentes de la sección transversal de la calzada, situadas en las zonas de paso preferente de las rodadas de los vehículos y son causadas por la acumulación de deformaciones irreversibles debidas a la fluencia de los materiales bituminosos integrantes del firme, bien de la capa de rodadura o bien de las capas inferiores de aquél.

En el presente caso, a la vista de los datos de las deflexiones facilitadas por ADM, se pudo deducir que el origen de las roderas no obedecía a un problema de carácter estructural. Consecuentemente, se decidió abordar el estudio desde la hipótesis de que la presencia de dichas roderas estaba motivada en anomalías en las mezclas bituminosas empleadas en la fabricación de éstas.

Sentada y aceptada esta hipótesis, el CEDEX y ADM acordaron seleccionar seis secciones representativas dentro de la red de carreteras objeto del estudio, en las que, tras una minuciosa inspección visual para confirmar su representatividad, se extrajeron testigos del firme en los que fundamentar los ensayos de laboratorio correspondientes, con el fin de confirmar o, en su caso, rebatir la hipótesis de partida. De estas seis secciones, tres presentaban claros problemas de roderas mientras que en las otras tres no se apreciaban deformaciones de esta naturaleza.

Por ser irrelevante para los fines de este artículo y no exceder la extensión prefijada no se detallan aquí las secciones seleccionadas ni las vías y puntos kilométricos correspondientes y se centrará la descripción en enunciar los ensayos de laboratorio realizados con las muestras tomadas, su justificación, los resultados obtenidos y las conclusiones que pueden extraerse de ellos.

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS TESTIGOS EXTRAIDOS DE LAS SECCIONES SELECCIONADAS

De acuerdo con la distribución de tareas convenida entre el CEDEX y ADM, el Laboratorio Público de Ensayos y Estudios de Marruecos (LPPE en sus siglas en francés) se encargó de tomar las muestras normalizadas de cada una de las secciones de ensayo elegidas, lo que acometió por medio de una sonda provista de coronas de corte diamantadas, de 100 y 300 mm de diámetro interior, y extrajo 21 muestras de cada sección, 5 de 300 mm y las restantes 16 de 100 mm de diámetro. Estas muestras fueron enviadas al Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, para su estudio en el laboratorio. La extracción de estas muestras permite conocer el espesor del firme y la adherencia entre las diferentes capas que lo forman, deduciéndose por un lado los valores de dichos espesores, y por otro, que la adherencia entre capas era satisfactoria.

7. INSPECCIÓN VISUAL

Con la información obtenida de los ensayos de laboratorio así como de la inspección visual realizada en las

propias autopistas se podrían enunciar las causas y formular las recomendaciones oportunas para proyectar las tipologías de los nuevos firmes de manera que permitan prevenir la aparición de roderas.

La inspección visual puso de manifiesto la existencia de roderas aunque no se apreciaba fisuración del material en las zonas en que éstas aparecían. En las secciones en donde las roderas eran más acentuadas se observaba la formación de rebordes laterales del material, característicos de estos fenómenos de deformación plástica.

Los datos sobre deflexiones facilitados por ADM, así como las inspecciones visuales realizadas, no parecían indicar que se hubieran producido problemas estructurales, por lo que resultaba pertinente admitir que las roderas observadas eran debidas a la acumulación de deformaciones permanentes en las capas bituminosas.

Generalmente, la capa de rodadura puede presentar ciertos fenómenos de postcompactación una vez abierta al tráfico y sometida a las cargas de éste. En este caso, se deduce que la compactación de los materiales del firme había sido satisfactoria con la salvedad de que en dos secciones exactamente iguales en cuanto al firme, al tráfico y demás acciones sobre ellas, en una aparecían roderas y en la otra no.

8. TRABAJOS DE LABORATORIO

Los ensayos realizados en el laboratorio del CEDEX sobre las muestras extraídas por ADM fueron los siguientes:

Sobre las mezclas bituminosas:

- Densidad y contenido de huecos.
- Determinación de la curva granulométrica y del contenido de ligante.
- Resistencia a la deformación plástica.
- Ensayo de compresión triaxial cíclica.
- Determinación del módulo resiliente a tracción indirecta a tres temperaturas de ensayo.

Sobre el ligante recuperado:

- Penetración a 25°C.
- Punto de reblandecimiento anillo y bola.
- Módulo complejo mediante DSR (8 frecuencias y 13 temperaturas).

8.1. Densidad de los testigos

Una vez extraídos los testigos se separaron las diferentes capas de firme mediante corte con sierra. Con el fin de que todas las muestras tuvieran un espesor similar, para poderlas someter al ensayo de resistencia a la formación de roderas, los testigos de 300 mm de diámetro se cortaron a un espesor normalizado de 60 mm, antes de determinar la densidad.

Para identificar las capas resultantes tras este proceso de corte se denominaron con las letras R, I o B, entendiendo que la capa R correspondía con la de rodadura, la I con la capa intermedia de unión, y la B la capa de base.

Concluidos estos preparativos se midió la densidad aparente de las muestras, de acuerdo con la norma de ensayo EN 12697-6, que se reflejaron en las tablas correspondientes.

Para evaluar el fenómeno de postcompactación experimentado en el firme por el paso de las cargas del tráfico desde el momento de la puesta en servicio, se utilizaron las muestras tomadas en la zona no rodada, del centro del carril, de cada una de las secciones estudiadas, que se compararon con las respectivas densidades de las zonas de rodada, de lo que también se elaboró la pertinente tabla.

Comparadas unas y otras, para cada punto de la sección transversal, se puede afirmar que con carácter general la postcompactación experimentada es relativamente pequeña, o expresado de otro modo, que la compactación del firme en el momento de su puesta en obra no presentaba ninguna deficiencia a la que se le pudiera atribuir la formación de las roderas.

8.2. Porcentaje de huecos

Para conocer el porcentaje de huecos de la muestra es necesario conocer la densidad máxima de la mezcla, lo que se puede obtener a partir del picnómetro o bien a partir de las densidades respectivas de cada uno de los componentes de la mezcla, estos es, de los áridos y del ligante utilizados en su elaboración.

En este estudio se han empleado los dos métodos; el primero, en aplicación de la norma EN 12697 -5, y el segundo, según el procedimiento descrito también en dicha norma. Con esta información se preparó una tabla con los valores de las densidades máximas obtenidas, los porcentajes de huecos de la mezcla y los huecos presentes en el esqueleto mineral, según lo especificado en la norma EN 12697 -8, a partir de estos valores de densidades.

Se determinaron igualmente las densidades y porcentajes de huecos de las zonas no rodadas con objeto de conocer, por comparación con los valores correspondientes de las zonas rodadas, la posible sobrecompactación del firme originada por el paso del tráfico. A este respecto se observó que los porcentajes de huecos de las zonas no rodadas construidas con mezclas BBSG y EME eran menores que en el resto de las mezclas, con valores inferiores al 3%, que es el límite aceptable de resistencia de un firme a las deformaciones permanentes.

El porcentaje de huecos debe ser superior al 3% para permitir una mínima expansión del ligante, tanto por efecto de la temperatura del firme como por la sobrecompactación causada por el tráfico. La normativa que regula los valores mínimos de este porcentaje de huecos en las mezclas bituminosas es del orden del 4%, y varía poco de unos países a otros; concretamente en España está fijada también por la normativa en el 4%

8.3. Compactación de las mezclas

Con objeto de conocer el nivel de compactación obtenido tras la puesta en obra de las mezclas bituminosas utilizadas en las seis secciones estudiadas se determinó la densidad de referencia de cada una de dichas mezclas. Para ello, tres testigos de cada una de las mezclas se recalentaron hasta una temperatura de 175 °C y se recompactaron en un compactador Marshall, aplicando 75 golpes por cara, de acuerdo con la norma correspondiente. Una vez enfriadas y desmoldadas las muestras se determinó la densidad

de referencia por el método hidrostático y se representaron los valores obtenidos en la correspondiente tabla.

Los resultados de este ensayo reafirman que las mezclas empleadas han sido bien compactadas, ya que los valores obtenidos fueron superiores al 98% de la densidad de referencia, salvo en una de ellas en la que dicha densidad fue del 96,8%.

8.4. Ensayo de roderas

La resistencia a la deformación permanente de los distintos tipos de mezclas de las diferentes secciones ha sido determinada por el ensayo de roderas, conforme a lo regulado en la norma EN 12697 -22. El equipo correspondiente consiste en una carga rodante que se aplica sobre una probeta fijada a un bastidor. Esta carga, de 700 N, se aplica con una rueda que se desplaza sobre la muestra al tiempo que un dispositivo va midiendo la huella que la rueda va marcando en la probeta.

La temperatura de la muestra y del recinto del ensayo se mantiene constante durante el transcurso de éste.

El comportamiento de los materiales ensayados en cuanto a deformación se evalúa a través de la profundidad de la marca que la rueda deja en la probeta tras un proceso de paso de cargas repetidas y a temperatura constante.

Los resultados vienen dados por la ecuación siguiente:

Tasa de roderas WTS_{AIR} : en mm por cada 1.000 ciclos de carga, calculados por la ecuación:

$$WTS_{AIR} = \frac{(d10000 - d5000)}{5}$$

En donde: d5000 y d10000 es la profundidad de la rodera tras 5.000 y 10.000 ciclos de carga aplicados, respectivamente.

Otro índice empleado en la evaluación de roderas es el PRD_{AIR} , que se define como el porcentaje de profundidad de una rodera en un material tras haber sido sometido a 10.000 ciclos de carga.

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- Carga aplicada sobre la rueda: 700 N
- Frecuencia del movimiento aplicado: 26, 5 ciclos/ minuto
- Recorrido de la rueda: 230 mm
- Temperatura del ensayo: 60 °C
- Número de réplicas: 2
- Duración del ensayo: 10.000 ciclos (aprox. 377 minutos)

Los valores de profundidad de la rodera obtenidos para cada muestra a lo largo del ensayo, en función del número de ciclos aplicado, se representó gráficamente, detectándose secciones en las que los valores de los parámetros WTS y PRD superaban, respectivamente 0,2 mm/1.000 ciclos y el 10%, lo que evidencia una débil resistencia a las deformaciones plásticas.

Incluso en alguna de las muestras no se pudo llegar a concluir el ensayo, con la aplicación de los 10.000 ciclos estipulados, debido a que la deformación acumulada superaba los límites de deformación permitidos por el equipo.



Figura 1. Equipo para ensayo de roderas.

Los resultados de este ensayo pusieron de manifiesto la buena relación entre la magnitud de las deformaciones plásticas realmente medidas en la carretera con los valores de los parámetros WTS y PRD obtenidos.

Como referencia sirva expresar que la normativa española señala limitaciones a los valores del parámetro WTS, para el que fija 0,07 mm y 0,1 mm/1.000 ciclos, según la intensidad del tráfico, la posición de la capa dentro del firme y el clima de la carretera.

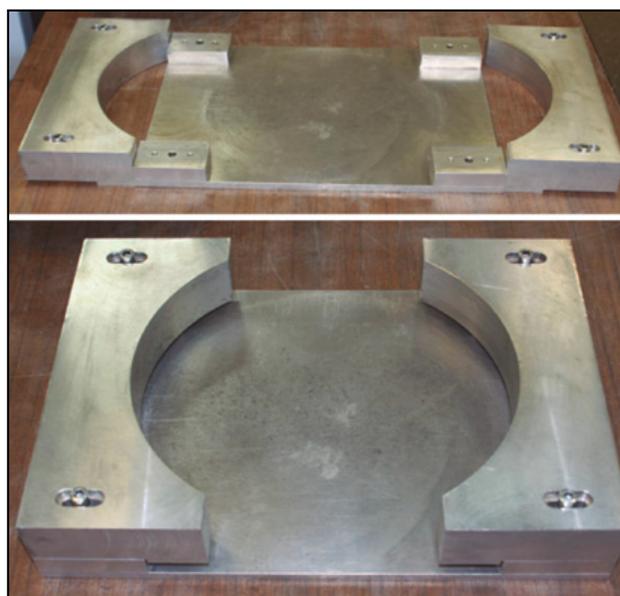


Figura 2. Dispositivo de fijación de las probetas para el ensayo de roderas.

8.5. Ensayo de compresión triaxial cíclica

La resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas bituminosas se puede evaluar también a través de

un ensayo de compresión triaxial cíclica, según el método definido en la norma europea EN 12697 -25.

En este ensayo, una probeta cilíndrica de mezcla bituminosa se somete a una determinada presión de confinamiento y a una carga axial cíclica. La presión de confinamiento puede aplicarse de forma estática o dinámica y la carga axial varía de acuerdo con una función sinusoidal.

En el transcurso del ensayo se mide la variación de la altura de la probeta en función del número de cargas aplicadas así como la deformación axial acumulada.

$$\varepsilon_N = 100(h_o - h_n)/h_o$$

donde, h_o es la altura inicial de la probeta expresada en mm y h_n la altura en mm después de n aplicaciones de la carga.



Figura 3. Equipo de ensayo de compresión triaxial cíclica.

Los resultados se muestran representando la deformación axial acumulada (deformación permanente) en función del número de ciclos de carga n , que es lo que se denomina curva de fluencia.

La resistencia a la deformación permanente de la muestra se puede determinar a partir de la interpretación de la curva de fluencia.

En el caso concreto de los materiales de este estudio, las probetas preparadas para la medida de la deformación plástica se protegieron con una membrana de caucho. Las condiciones del ensayo fueron las que se contemplan en la norma EN 13108 -20 para las capas de rodadura, con la diferencia de que la temperatura del ensayo se ha fijado en 60 °C en lugar de los 50 °C que prescribe dicha norma, para tener en consideración las circunstancias climatológicas de altas temperaturas que se presentan en las carreteras de Marruecos.

Las condiciones aplicadas a los materiales sometidos a este ensayo han sido las siguientes:

- Temperatura del ensayo: 60 °C
- Presión de confinamiento: 150 kPa
- Presión axial cíclica: 300 kPa

Los ciclos de carga aplicados en la presión axial tienen una duración de un segundo con un periodo de reposo entre dos ciclos consecutivos de igual duración.

Como resumen y conclusión de este ensayo procede expresar que los resultados obtenidos, aplicados a las seis secciones del estudio, reafirman la información del ensayo de roderas descrito en el apartado anterior.

8.6. Medida del módulo resiliente a tracción indirecta

Se pueden emplear diferentes métodos para conocer la rigidez de las mezclas bituminosas. En este estudio se ha estimado más conveniente utilizar el denominado “Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas”, descrito en el Anejo C de la norma EN 12697 -26.

La determinación de dicho módulo se ha efectuado con una prensa neumática contenida en un recinto termostático, para controlar la temperatura. El ensayo consiste en aplicar una carga cíclica de compresión diametral sobre la probeta y medir la variación que experimenta su diámetro.

Los módulos de las mezclas bituminosas de las seis secciones de las autopistas marroquíes se han determinado a partir de las probetas de 100 mm de diámetro extraídas de la calzada. Para ello se tomaron tres muestras de cada sección, se midieron sus respectivos valores del módulo resiliente y se obtuvo posteriormente el valor medio de las tres muestras como valor representativo de cada una de ellas.

Dado que la temperatura de las muestras tiene una influencia notable en la magnitud de estos módulos, las mediciones se han hecho a tres temperaturas, de 10, 20 y 30 °C y se han obtenido los valores correspondientes a cada una de ellas, que se representaron gráficamente.

Como en los parámetros anteriormente descritos, los resultados obtenidos de este ensayo se corresponden exactamente con los del ensayo de roderas anteriormente descrito.



Figura 4. Equipo para medida del módulo resiliente.

8.7. Determinación de la granulometría de las mezclas y del contenido de ligante

Este ensayo consiste en la extracción previa del ligante por disolución, siguiendo el método descrito en la Norma

EN 12697 - 2. Después de haber extraído el ligante en su totalidad, se procede a tamizar y pesar el material, siguiendo la norma UNE - 12697 -2.

De cada una de las mezclas utilizadas en las distintas secciones se ha determinado la distribución granulométrica de los áridos empleados en su construcción.

Las mezclas tipo BBSG presentan curvas granulométricas muy similares, con porcentajes de finos y filler en torno a 35% y 6%, respectivamente. El contenido de ligante de todas estas muestras fue prácticamente el mismo, del 5,8%. La relación filler/betún resultó próxima a la unidad, salvo en una de las muestras que obtuvo un valor de 1,3.

En España, las mezclas bituminosas de características similares, cuando se proyectan como capa de rodadura, se fabrican con un contenido de betún cercano al 5%, y una relación filler/betún de 1,2.

Las mezclas de alto módulo, empleadas como capa de unión o de base, presentan contenidos de ligante y filler prácticamente iguales a las mezclas BBSG, aunque con mayor proporción de finos.

Acerca de esto, procede señalar que las mezclas de alto módulo se fabrican en España con contenidos de betún ligeramente más bajos (del orden del 5,3 %) y porcentajes más altos de filler (7%), lo que significa que estas mezclas tienen, al menos desde un punto de vista teórico, mayor resistencia a las deformaciones permanentes y, en contrapartida menor resistencia a la fisuración por fatiga.

8.8. Características de los betunes recuperados de las muestras

Los betunes se extrajeron de las mezclas por disolución en diclorometano, separando la materia mineral sólida no disuelta por centrifugación con una centrifugadora de flujo continuo. Una vez retirada la materia mineral, el betún se recuperó por destilación con la ayuda de un equipo de evaporación rotativo. El procedimiento seguido para la recuperación del ligante de las mezclas es el descrito en la norma EN 12697 -3.

Los betunes recuperados se han caracterizado siguiendo métodos clásicos, así como mediante ensayos dinámicos con ayuda del reómetro.

8.8.1. Ensayos clásicos

Se aplicaron estos ensayos clásicos de caracterización, tales como el índice de penetración, el punto de reblandecimiento anillo-bola o el punto de fragilidad Fraass a los ligantes recuperados de las muestras que integraban la capa de rodadura y las capas de unión, y se observó que todos los ligantes recuperados presentaban una penetrabilidad relativamente alta, con valores entre 18 y 44, en contraste con otros casos en los que el ligante, por distintas circunstancias asociadas fundamentalmente a su permanencia a la intemperie, (oxidación, exposición a los rayos ultravioleta, etc.) dan valores más bajos de penetrabilidad.

Los puntos de reblandecimiento medidos para las diferentes muestras variaron entre 51 y 62 °C; esto que significa que los índices de penetrabilidad son negativos, lo que es indicio de una alta sensibilidad térmica.

Los valores de los puntos de fragilidad Fraass son coherentes con los correspondientes de penetrabilidad para todas las muestras.

Los betunes recuperados de las secciones con presencia de roderas ofrecían valores de penetrabilidad mayores y puntos de reblandecimiento más bajos, lo que contribuye de manera inequívoca a propiciar las deformaciones plásticas de las mezclas correspondientes.

Los ligantes recuperados de muestras de capas situadas por debajo de las de rodadura presentaron valores de penetrabilidad menores que los obtenidos en las correspondientes capas superiores, lo que parece contradecir la tendencia general, en la que a igualdad de las restantes condiciones, estos valores suelen ser mayores que los medidos en la capa expuesta a los efectos del clima y del tráfico.

8.8.2. Ensayo con reómetro de cizallamiento dinámico

El reómetro de cizallamiento dinámico es un equipo diseñado para medir las propiedades reológicas de los ligantes a través de dos parámetros, que son el módulo complejo de cizallamiento y el denominado ángulo de fase. Estas propiedades se miden a diferentes temperaturas, entre 10 °C y 82 °C, con intervalos de 6° C, y los tiempos de estabilización necesarios para garantizar que las muestras ensayadas se encuentran a la temperatura fijada en el ensayo.



Figura 5. Reómetro de cizallamiento dinámico. Detalle del dispositivo de torsión.

Se observó, en los resultados facilitados por este equipo, que los ligantes recuperados en todas las secciones que no presentaban roderas, para toda la gama de temperaturas que abarcaba este ensayo, daban módulos y ángulos de fase más altos, lo que constituye una garantía de disminución de las deformaciones plásticas. Se observó también que los resultados facilitados por el reómetro eran exactamente coincidentes con los obtenidos de los métodos clásicos, de penetrabilidad y temperatura del anillo y bola.

8.9. Ensayos de composición química

En general, los betunes empleados en la construcción de carreteras presentan una composición química y una estructura extremadamente complejas. Se suele admitir que los betunes responden a un sistema coloidal en el que está presente una suspensión de micelas de asfaltenos en un medio formado por hidrocarburos saturados, nafténicos y aromáticos (maltenos). Este sistema adquiere estabilidad con agentes peptizantes hidrocarburos aromáticos polarizados, llamados resinas.

Este coloide permanece en estado de sol hasta que la peptización aumenta suficientemente y aumenta la proporción de asfaltenos y se reduce la correspondiente de resinas.

En este estudio, a petición de ADM, se determinó la proporción de asfaltenos y resinas presentes en los betunes recuperados de las muestras. Tras el ensayo, realizado conforme a la norma EN 12606 -2, se obtuvo que las concentraciones de asfaltenos en muestras procedentes de mezclas BBSG y GB estaban comprendidos entre 13,9 y 24,3%, lo que indicaba que en la fabricación de los betunes podrían haber intervenido crudos petrolíferos de diferentes procedencias, o haber estado sometidos a procesos de craqueo y refino también diferentes.

En general, y para el caso estudiado, los contenidos de asfaltenos en los betunes resultaban relativamente altos, de donde se podría inferir que no existía un déficit de micelas en el sistema coloidal.

El contenido de parafinas medido resultó inferior al 4,5 %, que establece como límite máximo la norma francesa NF EN 12591, aplicada en este caso, y consecuentemente, los betunes podrían considerarse conformes a este requisito.

8. 10. Caracterización de los áridos obtenidos de las muestras

Los áridos constituyen el esqueleto mineral de las mezclas y sus propiedades tienen una influencia decisiva en las características y el comportamiento de éstas.

La angularidad favorece el rozamiento interno entre las partículas y aumenta la resistencia mecánica de la mezcla. La forma de las partículas del árido también es determinante para prevenir el deterioro del firme causado por la acción del tráfico. Estos dos factores intervienen de manera notable en el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a las deformaciones plásticas.

Consecuentemente, para completar el estudio, se analizaron las propiedades de los áridos recuperados de las muestras y se caracterizaron de acuerdo con las normas EN 933 -3 y EN 933 -5, tituladas “Determinación de la forma de los áridos. Índice de lajas” y “Determinación de las caras de fractura”, respectivamente.

Se detectó que los áridos recuperados presentaban formas aceptables y, en todo caso, apropiados para el tipo de carretera en el que se habían utilizado.

En lo que respecta a la angularidad de las partículas, se observó que los áridos de alguna de las secciones estudiadas no habían recibido un machaqueo suficiente, esto es, que el número de caras de fractura presentes era relativamente bajo, lo que reducía el ángulo de rozamiento interno y la resistencia a la deformación permanente, por lo que sería aconsejable que se utilizaran únicamente áridos procedentes de machaqueo y se evitara, asimismo, la utilización de arenas naturales sin caras de fractura.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El objetivo principal de esta investigación es conocer la contribución de las características de la calzada, el tráfico y las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas bituminosas en la formación de roderas en las carreteras de Marruecos.

Para abordar este problema se mantuvieron dos reuniones técnicas entre ADM y el CEDEX, la primera, con el

fin de intercambiar criterios y obtener información general acerca de la estructura de los pavimentos, los materiales utilizados, las especificaciones, el tipo de tráfico pesado, etc., y la segunda para analizar la magnitud de las deflexiones y conocer los perfiles longitudinales y transversales de los tramos de estudio, para evaluar los tramos de carretera afectados por roderas, así como la magnitud de éstas.

Sobre la base de estos datos de roderas y deflexiones y teniendo en cuenta otros factores complementarios, como el clima, el relieve, la estructura de la carretera, la intensidad del tráfico y el tiempo desde su puesta en servicio, se seleccionaron seis secciones, de las cuales tres presentaban problemas de roderas y las otras tres, con la misma estructura y tipo de firme, no presentaban ningún problema visible; éstas últimas tenían la misión de actuar como secciones de referencia así como para poder establecer comparaciones entre ellas.

En todas estas secciones se llevó a cabo una inspección visual y se extrajeron muestras del firme para conocer y cuantificar sus componentes así como para caracterizar el betún con el que se habían fabricado.

9.1. Conclusiones particulares

A la luz de los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La inspección visual de las secciones confirmó la existencia puntual de roderas aunque éstas no presentaban grietas, baches o hundimientos. La magnitud de las roderas variaba de unas secciones a otras, si bien, en la sección más cargada éstas resultaban ser más severas y, asociadas a su presencia, aparecían costillas laterales y sangrados, así como desplazamientos laterales de la mezcla bituminosa, que son características típicas del arrastre del asfalto hacia el exterior de la capa.
- Generalmente, las capas de rodadura tenían pequeños valores de postcompactación, lo que indica que hubo una buena compactación durante la aplicación de la mezcla asfáltica en el momento de la construcción de las autopistas.
- Los porcentajes de huecos en un firme tipo BBSG de alto módulo eran generalmente muy bajos, menos del 3%, que es el límite aceptable para que la mezcla tenga una buena resistencia a la deformación permanente. En España, el mínimo requerido para una capa de rodadura de características similares es del 4%. La aplicación de mezclas con alto índice de huecos contribuye a evitar la aparición de roderas.
- En general, la compactación llevada a cabo sobre la mezcla fue correcta, alcanzando el 98% de las tasas de densidad de referencia de compactación. En España, la densidad resultante (grado de compactación) debe ser mayor que 98% de la densidad de referencia.
- Las capas de rodadura tipo hormigón bituminoso utilizadas en algunas de las secciones estudiadas ofrecían unos valores de los parámetros WTS (roderas, expresadas en mm/1.000 ciclos de carga) y PRD (porcentaje medio de roderas) mayor de 0,2 mm/1.000 ciclos y 10%, respectivamente, lo que da idea de un firme con una baja resistencia a la deformación plástica.

- La mezcla empleada en otras dos secciones estudiadas daba unos valores para estos mismos parámetros de 0,07 mm/1.000 ciclos y del 5%, lo que evidencia una buena resistencia a la formación de roderas; aunque la mezcla bituminosa de alto módulo empleada como capa de unión en una de éstas presenta una resistencia muy baja. En España el parámetro WTS debe ser menor de 0,07 o 0,1 según la intensidad del tráfico y el clima de la carretera.
- Las mezclas tipo BBSG no deterioradas presentan valores de WTS alrededor del 0,1 y el parámetro PRD menor del 5%, lo que muestra buena resistencia a la formación de roderas.
- Los parámetros WTS y PRD obtenidos de las muestras tomadas en el centro del carril, no afectadas por la rodada, resultaron ser similares a los equivalentes de las zonas de rodada, de lo que se infiere que la falta de compactación no era la causa de la formación de las roderas.
- En el ensayo de compresión triaxial cíclica, que se utiliza para determinar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas bituminosas y permite detectar comportamientos anómalos en las mezclas, los resultados obtenidos de las muestras estudiadas, expresan la misma tendencia que los del ensayo de roderas.
- Como a partir de los datos de deflexión, proporcionados por ADM, y de la inspección visual no parece desprenderse que existan problemas estructurales en las autopistas de Marruecos, el origen de las roderas aparecidas en dichas autopistas debe asociarse con la existencia de deformaciones permanentes en las mezclas bituminosas que constituyen el firme.
- Respecto a los módulos resilientes a tracción indirecta, que caracterizan la rigidez de las mezclas bituminosas, se encontró que las mezclas que presentaban una baja resistencia a la formación de roderas son las que presentan módulos más bajos a 30 °C. De nuevo se llega a que los módulos resilientes tienen la misma tendencia que los correspondientes resultados obtenidos con el ensayo de roderas.
- Las mezclas bituminosas tipo BBSG contenían niveles de ligante del orden del 5,8%, lo que aconseja, de acuerdo con la experiencia española, reducir el porcentaje de betún para mejorar la resistencia a las deformaciones permanentes.
- Los betunes recuperados en el laboratorio a partir de los testigos de las secciones afectadas por las roderas, tanto del tipo BBSG como de alto módulo, mostraban unos valores de penetrabilidad más altos y puntos de reblandecimiento más bajos, lo que sin duda contribuye a reducir la resistencia a la deformación plástica.
- Los betunes recuperados en las secciones afectadas presentan parámetros y módulos bajos $G/\text{sen } \delta$ más bajos, por tanto, confieren a las mezclas una baja resistencia a la deformación permanente. Estos resultados corroboran los obtenidos con los ensayos convencionales.
- En general, el contenido de asfaltenos es relativamente alto y no permite deducir que exista un déficit de micelas en el sistema coloidal. Los contenidos de

parafinas detectados en los betunes estudiados son menores del límite de 4,5%, establecido en la especificación francesa.

- Los áridos utilizados en dos de las secciones estudiadas, preparadas con mezclas tipo BBSG, no procedían en su totalidad del machaqueo, lo que contribuye a reducir el rozamiento interno y la resistencia a la deformación permanente.

9.2. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados de los ensayos y con las conclusiones anteriormente expuestas, las recomendaciones que podrían contribuir a la prevención de deformaciones permanentes en las mezclas bituminosas, serían las siguientes:

Ligantes hidrocarburados

- Mejorar la susceptibilidad de los ligantes a la temperatura para aumentar su resistencia a la fluencia. El uso de betunes con índices de penetrabilidad más altos que los actualmente utilizados permitiría mejorar la resistencia de las mezclas a las deformaciones plásticas.

Actualmente se dispone de tecnologías que permiten mejorar estas características para adaptarlas a los requerimientos de cada caso.

- Considerar la utilización de betunes modificados con polímeros en las calzadas principales de las autopistas, especialmente en los carriles por los que transita el tráfico pesado, en rampas prolongadas y en zonas climáticas sometidas a temperaturas muy altas.
- Evaluar la resistencia de los betunes a las deformaciones permanentes por medio del reómetro de cizallamiento dinámico, o estimar la temperatura máxima a la que puede estar sometida la mezcla en el pavimento sin que se detecte la formación de roderas.

Áridos:

- Aumentar las exigencias sobre la angularidad de los áridos con el fin de aumentar el rozamiento interno y la resistencia de la mezcla a la formación de roderas, para lo que sería conveniente utilizar exclusivamente áridos procedentes de machaqueo.
- Prohibir la utilización de arenas naturales de grano redondeado, para aumentar el rozamiento interno y la estabilidad de la mezcla.
- Utilizar filler finos y activos, para aumentar la rigidez del mástic filler-betún. Si el filler contenido en los áridos no fuera adecuado, se recomienda utilizar filler de aportación.

Mezclas bituminosas:

- Preparar mezclas tipo BBSG y EME con un mayor porcentaje de huecos para evitar la aparición de roderas. El porcentaje de huecos de las mezclas debe ser superior al 4% y el del esqueleto mineral correspondiente superior al 14%.

- Reducir la proporción de ligante en las mezclas tipo BBSG para mejorar la resistencia a la formación de roderas.
- Revisar los requisitos que señala el método y las especificaciones del ensayo de roderas actualmente empleado para constatar que se adecuan a las circunstancias locales del tráfico y a las condiciones orográficas y climatológicas de Marruecos.
- Utilizar dicho ensayo de roderas para controlar la fabricación de las mezclas bituminosas en las plantas de fabricación y verificar en origen que éstas presentan una resistencia adecuada a las deformaciones permanentes.

10. AGRADECIMIENTOS

Este informe es una síntesis del informe emitido en abril de 2013 por el CEDEX, de título “Contribution à la compréhension et la maîtrise du problème d’orniérage au Maroc”, y de la posterior difusión de su contenido a través

de una publicación editada con el título “Chaussée guérir de l’orniérage”. En la elaboración de ambos documentos intervino activamente el Doctor Ingeniero Derradji Abdelkrim, en representación de la Sociedad Nacional de Autopistas de Marruecos, a quien agradecemos con estas líneas su colaboración y el interés mostrados en la realización del trabajo. Igualmente queremos agradecer su participación al resto del equipo marroquí.

No podemos dejar de citar a los propios autores del informe, que fueron D^a Mercedes Sosa Bravo, D. Baltasar Rubio Guzmán y D. Óscar Gutiérrez- Bolívar Álvarez, así como al resto de los intervinientes del CEDEX, a quienes hacemos extensible este agradecimiento.

11. BIBLIOGRAFÍA

CEDEX (2013). *Contribution à la compréhension et la maîtrise du problème d’orniérage au Maroc*. Abril 2013.

CEDEX (2014). *Chaussée guérir de l’orniérage. Autoroutes du Maroc-CEDEX*. Junio 2014.