

Las características superficiales de las carreteras ya no son sólo una cuestión de seguridad y confort

Los criterios clásicos de toma de decisión para llevar a cabo las operaciones de mantenimiento de las carreteras se han basado en la preservación de la capacidad estructural del firme y de alguna de las características funcionales de la capa de rodadura.

En la última década se ha producido un gran desarrollo de las metodologías de análisis de impacto medioambiental, que están complementando a los enfoques tradicionales (económicos y de prestaciones). En el caso de las carreteras, los datos disponibles permiten afirmar que, en el caso de carreteras de alta intensidad de tráfico, la uniformidad de la capa de rodadura es un factor esencial para minimizar el impacto ambiental del tráfico al reducirse de forma sustancial el consumo de combustible.

En este trabajo se muestra un análisis comparativo de los impactos ambientales y económicos derivados de realizar operaciones de pavimentación que tengan como objetivo el optimizar la regularidad superficial de la capa de rodadura.

Palabras clave: asfalto, carretera, consumo combustible, regularidad superficial, resistencia a la rodadura

Standard decision making criteria for maintenance operations of roads have been based on keeping the structural integrity of the pavements and some functional characteristics of the wearing course.

In the last decade there has been a great development of methodologies regarding environmental impact assessment, which are complementing traditional approaches (financial and performance). In the case of roads, the available data support the conclusion that, in the case of high traffic roads, evenness of the wearing course is essential to minimize the environmental impact of traffic by reducing substantially fuel consumption.

In this paper it is shown a comparative analysis of the environmental and economic impacts resulting from paving operations which are focused in optimizing evenness of the wearing courses.

Keywords: asphalt, road, fuel consumption, evenness, rolling resistance

José Luis Peña, jlpena@asefma.com.es
Asefma

1. Introducción

El diseño de las infraestructuras y su posterior mantenimiento se ha venido realizando mediante criterios económicos y técnicos, estos últimos basados en la durabilidad y en las prestaciones funcionales. Los criterios medioambientales de diseño se restringían normalmente a la evaluación de impactos sobre entornos naturales de especial valor o, en el caso de los mapas de ruido, su impacto sobre las zonas habitadas.

Con la aparición de la sostenibilidad como concepto fundamental en el que se deben basar todas las actividades, se hizo necesario el desarrollo de herramientas que permitiesen realizar esta evaluación con unos niveles de precisión lo suficientemente altos.

El análisis de la sostenibilidad tenía, inicialmente, un marcado carácter medioambiental. Sin embargo, cada vez es más frecuente encontrar estudios que valoran paralelamente aspectos medioambientales y económicos. Para la mayor parte del público no especializado en estos temas, se suele asociar que los criterios económicos y medioambientales transcurren por caminos divergentes, lo que es cierto en algunos casos, pero también nos encontramos áreas de actividad en las que

Las características superficiales de las carreteras ya no son sólo una cuestión de seguridad y confort

pueden ir perfectamente de la mano, como es el caso de la mayoría de las operaciones de conservación de las carreteras. En la actualidad, los análisis de sostenibilidad ofrecen un enfoque holístico, incluyendo aspectos económicos, sociales y ambientales.

Para llevar a cabo dicha tarea, una de las herramientas más utilizadas son el análisis de ciclo de vida (ACV) y el análisis de coste de ciclo de vida (ACCV). En este caso concreto, el estudio se centra en cómo optimizar el desarrollo de las obras de conservación de las carreteras, teniendo en cuenta incluso la fase de uso de la carretera.

2. Análisis de ciclo de vida

El ACV intenta recopilar los impactos potenciales generados por el sistema objeto de análisis. Los impactos tienen un mecanismo ambiental asociado que permite clasificarlos en diversas categorías. No todas ellas son igualmente fáciles de evaluar, siendo la cuantificación el hecho más relevante a la hora de poder tomar decisiones. Como en todo campo científico, la precisión de los datos es crítica para que los sesgos generados en el análisis no invaliden la certidumbre que se pretende conseguir.

La metodología de ACV está bastante desarrollada, existiendo normativa ampliamente consensuada para su aplicación práctica (ISO 14040; ISO 14044). En el caso concreto de la construcción y conservación de carreteras, los primeros trabajos fueron desarrollados en Suecia (Stripple, 2001). El número de trabajos realizados en este campo se ha ido incrementando de forma exponencial, comenzando a ser una metodología utilizada de forma común en muchos trabajos en los que los análisis medioambientales tienen importancia.

No es objeto de este trabajo entrar en detalle sobre el uso de la metodología ACV. Tan sólo recordar que en la mayoría de las publicaciones se suelen incluir como fases del análisis las siguientes: construcción, mantenimiento, uso y fin de vida. En este caso concreto, el análisis medioambiental se basará en las emisiones de gases de efecto invernadero, soslayando otros tipos de impactos (daños a la salud y a los recursos naturales), debido a la falta de datos publicados sobre estos últimos que sean relevantes para evaluar la influencia del estado de conservación de las carreteras sobre la fase de explotación.

Una herramienta complementaria al ACV es el análisis de coste de ciclo de vida (ACCV), que permite comparar, desde un punto de vista económico, diversas alternativas de construcción o mantenimiento de las carreteras. La unión del ACV y ACCV permite realizar una evaluación en profundidad de las diversas alternativas, siendo misión de los gestores de las infraestructuras decidir a qué componente se le presta más prioridad (la medioambiental o la económica) en el caso de que sean contradictorias, hecho que no siempre ocurre.

3. Efectos de la regularidad superficial del pavimento

Desde finales de los años 80, en EEUU se comenzaron a publicar diversos trabajos (Papagiannakis et al, 1997) sobre la influencia de la regularidad superficial de los pavimentos en la durabilidad de los mismos, debido a las cargas dinámicas inducidas al paso de los vehículos pesados, principalmente. Por medio de estos estudios, se llegaron a establecer valores límite de la regularidad superficial (Doseung L. et al, 2002), a partir de los cuales el deterioro del pavimento aumentaba de forma exponencial. Estudios como el realizado por la Perra R.W et al (1998) o el del TRB (2001) permitieron generar modelos de evolución de la regularidad superficial.

También se han realizado numerosos estudios que evalúan el coste que tiene, para los usuarios y para los gestores de las carreteras, la deficiente regularidad superficial de los pavimentos (Zhang et al 2010). En EEUU, muchos de estos estudios se entraron en los costes asociados que tenían sobre el mantenimiento de los vehículos. Consideraciones adicionales sobre cómo optimizar el mantenimiento de las carreteras se pueden leer en informes como el elaborado por C-SHRP (1996), en el que se demuestra que carreteras construidas con altos niveles de regularidad superficial tenían menos fisuración y permiten conservar durante más tiempo una buena regularidad superficial (Raymond et al, 2005).

El software HDM-4, ampliamente utilizado para la evaluación de infraestructuras viarias, también contempla la influencia de la regularidad superficial sobre los costes de operación de los usuarios (averías, mantenimiento, consumo de combustible etc). Sin embargo, ha sido a raíz de la popularización del ACV como metodología cuando se ha empezado a estudiar más en detalle el alcance real que puede tener la regularidad superficial.

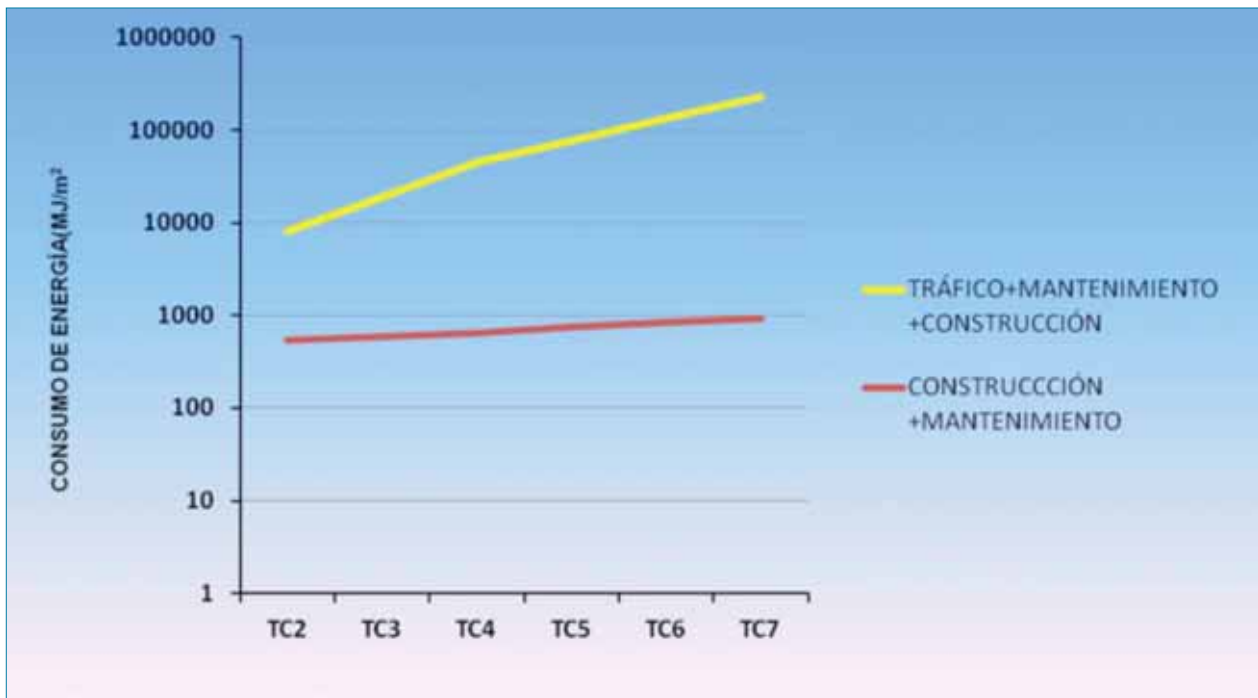


Figura 1. Consumo comparativo de energía de las diversas fases del análisis de ciclo de vida de las carreteras. Fuente Chappat et Bilal (2003)

Chappat y Bilal (2003) ya dan cuenta que la gran importancia relativa que tienen los impactos generados por el tráfico en comparación con los de la construcción y mantenimiento de las carreteras, especialmente en aquellas con intensidades de tráfico elevadas. Los datos del trabajo provienen, mayoritariamente, del trabajo publicado por Stripple (2001), pero el posterior análisis realizado es muy destacable.

Como puede verse en la Figura 1, el consumo energético del tráfico a lo largo del periodo que comprende el estudio (30 años) puede ser más de 100 veces el consumo energético implicado en la construcción y el mantenimiento de la carretera para intensidades de tráfico elevadas. Incluso en el caso de intensidades de tráfico bajas, el factor de proporcionalidad es de unas 10 veces.

Es evidente la gran importancia que tiene el factor tiempo en este tipo de análisis, siendo la durabilidad un requisito básico para favorecer la sostenibilidad. El concepto durabilidad, aplicado a una carretera, puede tener un doble sentido. El primero, y más genérico, atendiendo al tiempo que dicha infraestructura está operativa, independientemente de sus niveles de calidad de servicio. La segunda acepción se refiere a la capacidad de mantener las propiedades iniciales el mayor tiempo posible.

Es precisamente esta segunda acepción la que está presente en los nuevos criterios de diseño de firmes, que tienen como objetivo principal la construcción de pavimentos de larga duración (ELLPAG, 2009), y que se definen como “aquellos en los que, bajo un correcto diseño y construcción, los elementos estructurales duran indefinidamente, supuesto que las máximas cargas aplicadas y las condiciones ambientales no exceden los requisitos del diseño y que se lleva a cabo un adecuado mantenimiento de la capa de rodadura”. En el caso concreto que nos ocupa, la regularidad superficial, ésta puede empeorar debido a factores de diseño y construcción de la capa de rodadura (o incluso de las capas inferiores) o por factores estructurales que generen deformaciones generalizadas en el firme.

Desde un punto de vista de diseño del firme y de los materiales que lo componen, el concepto de pavimento de larga duración encaja perfectamente con las previsiones obtenidas a partir de la metodología de ACV: construir con un objetivo de gran durabilidad es sostenible, tanto desde un punto de vista económico como medioambiental. Asumiendo que el diseño estructural del firme es el adecuado, vamos a centrarnos en las consecuencias derivadas de la regularidad superficial de las capas de rodadura para ver su influencia en los

Las características superficiales de las carreteras ya no son sólo una cuestión de seguridad y confort

consumos de combustible de los vehículos que transitan sobre las mismas.

4. Resistencia a la rodadura y consumo de combustible

De los datos vistos anteriormente, es fácil deducir que el consumo de combustible de los vehículos es el factor más importante en el ACV de carreteras de alta intensidad de tráfico. Por lo tanto, parece imprescindible actuar sobre el mismo de forma sistemática.

En los últimos años se han producido grandes avances en la tecnología de los motores de combustión debidos, en gran medida, a la aplicación de la electrónica. Gracias a estos desarrollos los consumos medios de los vehículos se han reducido sustancialmente. Es posible que si el desarrollo de vehículos eléctricos o híbridos alcance un nivel suficiente, el consumo de combustible vuelva a reducirse drásticamente. En cualquier caso, el consumo de cualquier tipo de combustible o energía que propulse un vehículo vendrá determinado por la resistencia a la rodadura del pavimento.

El análisis del consumo de combustible en función de las características de la capa de rodadura es un trabajo relativamente antiguo. Centrándonos en periodos relativamente recientes, Sandberg (1990) realizó un estudio sobre vehículos ligeros a diversas velocidades sobre pavimentos con variadas características de macrotextura (MPD) y regularidad superficial. Las variaciones de consumo estaban en el rango del 7 al 11%.

Un resumen de los principales trabajos efectuados fue elaborado por EAPA en 2004 bajo el título "Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements". Muchos de los estudios referenciados adolecían de imprecisión, por lo que si bien los resultados podían considerarse correctos en términos generales, su validez para llevar a cabo estudios de ACV y ACCV era muy limitada, máxime teniendo en cuenta las mejoras introducidas en la eficiencia de los vehículos que enmascaraban otros puntos de mejora de la eficiencia energética como es el caso de la resistencia a la rodadura.

Ha sido a raíz del desarrollo de diversos proyectos europeos como ECRPD (Energy Conservation in Road Pavement Design), TYROSAFE, SILVIA ó MIRIAM cuando se han comenzado a dar pasos precisos en el estudio de la correlación de las características superficiales de la carretera y la resistencia a la rodadura del vehículo.

Hammarström et al (2009), en el proyecto ECRPD, publicaron un detallado trabajo basado en el método de mediciones de vehículos en punto muerto. De dicho trabajo es especialmente destacable el análisis estadístico de los datos. Al igual que en trabajos anteriores, se confirma que el factor determinante es la regularidad superficial, aunque la macrotextura también tiene una importancia relativa. Ya dentro del proyecto MIRIAM, Hammarström et al (2012), se amplió el estudio de la modelización de la resistencia a la rodadura en diversos tipos de vehículos.

Otro de los trabajos más significativos es el de Chatti K. (2012). Este informe fue realizado para calibrar el modelo físico incluido en el software HDM-4. Como conclusiones más importantes podría destacarse que un aumento de 1 m/km en el IRI genera un incremento de combustible del 2% para vehículos ligeros, independientemente de la velocidad, mientras que en el caso de vehículos pesados la velocidad sí influye.

Los datos más recientes provienen del proyecto MIRIAM, en el que están involucrados laboratorios de Europa y EEUU. Karlsson et al (2012) han realizado un interesante trabajo analizando el impacto energético de la resistencia a la rodadura. En él se indica que la resistencia a la rodadura disminuye con la velocidad y que es más importante para vehículos pesados. Una consideración interesante para los gestores de carreteras es que el ahorro de combustible asociado a la resistencia a la rodadura tan solo tiene sentido cuando los vehículos aceleran o van a velocidad constante; es decir, en zonas de frenada o de bajada no hay ninguna influencia. Un aspecto especialmente importante del proyecto MIRIAM es el estudio comparativo de diversos equipos de medida de la resistencia a la rodadura. Del éxito de estas medidas depende en gran parte la validación de los diversos modelos que son la base de los cálculos de ahorro energético.

Una recopilación del estado del arte de los métodos de medición de la resistencia a la rodadura junto con un análisis crítico se puede encontrar en el trabajo de Sandberg (2011).

5. Análisis de la sostenibilidad de las obras de conservación de carreteras

Es evidente que a la luz de los datos disponibles es posible comparar los impactos generados por las características superficiales de un pavimento. En caso del encontrarse lejos

del óptimo, podemos proceder a realizar una obra de conservación del pavimento. Pero, ¿cuál es el nivel de retorno esperado de dicha actuación?

Un magnífico ejemplo de cómo llevar a cabo esta evaluación es el trabajo de Wang T. et al (2012) realizado por el Pavement Research Center de la Universidad de California. En este informe se analizan los impactos medioambientales (consumo de energía y emisiones de CO₂) para diversos pavimentos (hormigón y asfalto) e intensidades de tráfico, comparando el resultado de realizar una actuación de conservación del pavimento frente a no hacer nada. Los resultados concuerdan con los estudios de Chappat (2003). En las carreteras de alta intensidad de tráfico, la energía consumida durante la fase de uso es de 7 a 11 veces superior a la energía consumida en el mantenimiento, obteniéndose el retorno de la “inversión”, en términos de impacto medioambiental, en poco más de un año. Lo más importante del trabajo es que disponen de las herramientas para modelizar los deterioros y poder, por tanto, predecir cuál es la actuación más ventajosa.

6. Aplicación al caso español

El siguiente paso es verificar si las estimaciones realizadas en otros países tienen aplicación en el caso de la red de carreteras de España. En primer lugar, para centrar el campo de actuación y a la luz de los datos de otros países, el caso de retorno más evidente se produce en carreteras de alta intensidad de tráfico, por lo que se van a tomar como elementos del análisis tanto las autopistas de peaje, las autopistas libres y las autovías de la red a cargo del Estado.

Según los datos publicados por el Ministerio de Fomento (Mapa de Tráfico 2011), la red de carreteras del Estado incluía 2537 km de autopistas de peaje, 8243 km de autopistas libres y autovías y 588 km de carreteras de doble calzada. A partir de los datos del Mapa de Tráfico 2011 del Ministerio de Fomento se han recopilado los correspondientes a las carreteras con mayor intensidad de tráfico (Tabla 1).

Como resumen, la red de carreteras de Estado tiene más de 4500 km con IMD igual o superior a 20000 vehículos al día. A esta cantidad había que añadir las carreteras dependientes de las comunidades autónomas, que no han sido evaluadas en este trabajo. Por lo tanto, el potencial campo de actuación puede considerarse realmente relevante.

Para poder evaluar el impacto comparativo entre realizar obras que afecten a la regularidad superficial del pavimento y no efectuar ninguna actuación, se ha partido de las siguientes hipótesis de trabajo:

- La unidad de comparación es 1 km de longitud de calzada.
- El periodo de análisis es de 1 año.
- La actuación de reasfaltado se haría en todo el ancho de la calzada. Se ha tomado como ejemplo típico una sección con dos calzadas (22 m), lo que sitúa las estimaciones en la posición más desfavorable.
- El espesor medio a aplicar de mezclas bituminosas se ha estimado en 4 cm. Con los medios técnicos disponibles es factible realizar esta operación con un menor espesor, pero en aras de un criterio de prudencia el exceso de espesor se podría aplicar a la reparación en profundidad de zonas con ligeros daños estructurales.
- El ahorro en consumo de combustible se ha estimado en un 1,5%, que estaría en el rango bajo de las referencias

Tabla 1. Longitud de las carreteras estatales en España según IMD.

Rango de IMD	Longitud (km)
20.000 a 24.999	1.483
25.000 a 29.999	766
30.000 a 39.999	878
40.000 a 49.999	448
50.000 a 59.999	278
60.000 a 69.999	278
70.000 a 79.999	95
80.000 a 89.999	68
90.000 a 99.999	56
100.000 a 109.999	57
110.000 a 119.999	89
> 120.000	169

Las características superficiales de las carreteras ya no son sólo una cuestión de seguridad y confort

bibliográficas más conservadoras (Wang T. et al 2012). En la reducción de combustible se ha incorporado el efecto de la regularidad superficial y de la macrotextura.

- La huella de carbono de las mezclas bituminosas se ha estimado en 65 kg/CO₂, que correspondería a una mezcla tipo BBTM fabricada con BMP y áridos poco pulimentables.
- El consumo medio de combustible de los vehículos se ha estimado en 6 l/100 km a partir de datos del IDAE (2013). Los datos vuelven a ser prudentes, ya que se trata de vehículos nuevos y no se ha tenido en cuenta el consumo de los vehículos industriales.
- Precio medio del combustible 1,37 €/l (fuente www.petromercado.com)
- Precio de la mezcla asfáltica (puesta en obra): 70 €/t

Otras consideraciones que no se han tenido en cuenta en el estudio han sido las siguientes:

- Coste e impactos del fresado en las zonas donde fuese necesario (no se ha estudiado la alternativa de fresar únicamente el carril de vehículos lentos, que suele tener unas condiciones de rodadura muy inferiores).
- Coste e impactos de la pintura.
- Impacto positivo procedente de la generación de fresado que puede ser utilizado en otras obras (debido a las limitaciones normativas, no se ha considerado el uso de RAP en las formulaciones de las mezclas asfálticas para capas de rodadura). Tampoco se ha tenido en cuenta el impacto económico positivo generado por la recogida del fresado.
- La volatilidad en el precio del petróleo afectaría al coste de la mezcla asfáltica pero se compensaría en igual medida en el coste del combustible.

Partiendo de los datos anteriores, se ha procedido a calcular el impacto económico y la huella de carbono generada por dos opciones: no realizar ninguna actuación sobre el pavimento y la aplicación de una capa de rodadura nueva que permita mejorar la regularidad superficial (IRI) y optimizando la macrotextura. En el caso de la huella de carbono, se compara el efecto generado por la realización de la obra frente a la reducción de emisiones causada por el ahorro de combustible, mientras que en el estudio económico se compara el coste de la obra frente al ahorro generado a los usuarios

por el menor consumo de combustible de sus vehículos. Estudiando ambas opciones se ha procedido a calcular el tiempo (medido en años) necesario para compensar la huella de carbono generada por la obra y su coste asociado mediante el ahorro de combustible de los vehículos que transitan.

En términos medioambientales, utilizando la huella de carbono como criterio de comparación, la actuación sobre la calzada para optimizar la macrotextura y la regularidad superficial tendría un retorno como el mostrado en la Figura 2.

Podemos ver, que para IMD del orden de 70000 vehículos/día, en dos años se recuperaría el impacto de la huella de carbono.

Desde un punto de vista económico los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.

El análisis económico se ha simplificado, no teniendo en cuenta los retornos generados por la inversión en obra pública, pero tampoco se ha tenido en cuenta la merma en recaudación que generaría la menor recaudación tributaria al disminuir el consumo de combustible. En cualquier caso, para altas intensidades de tráfico las cifras mostradas indican que los periodos de retorno de la inversión son moderadamente aceptables.

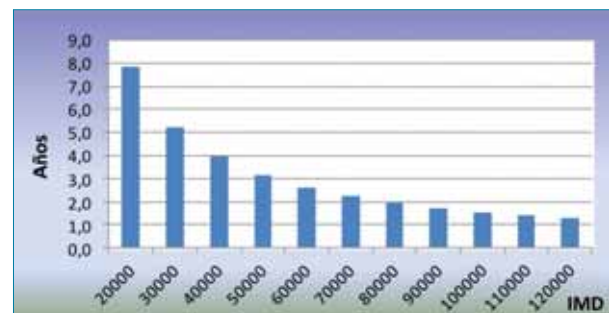


Figura 2. Tiempo necesario para compensar el impacto generado en la huella de carbono por las obras de pavimentación.

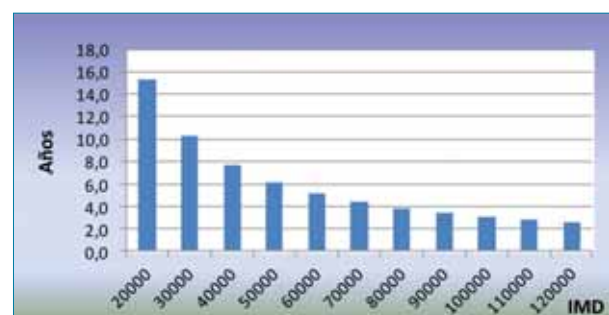


Figura 3. Tiempo necesario para recuperar la inversión de las obras de pavimentación.

El objetivo de esta evaluación simplificada es demostrar que vale la pena hacer un análisis pormenorizado desde el punto de vista ambiental y económico teniendo en cuenta la calidad de la rodadura sobre las carreteras y no tan solo su capacidad estructural. Un estudio más pormenorizado podría incluir detalles específicos como: zonas de rodadura que no afectan al consumo (pendientes de bajada), optimización de las zonas a actuar (carriles más deteriorados), optimización de los espesores de mezcla asfáltica mediante el uso de áridos de pequeño tamaño, unidades de obra menores, ahorros generados en el mantenimiento de los vehículos etc.

Otras consideraciones relativas a la efectividad de estas actuaciones están relacionadas con la influencia que tiene el comportamiento estructural del firme. Parece evidente que conseguir mantener la regularidad superficial es un objetivo muy "rentable", por lo que la calidad de la construcción, o de las actuaciones de rehabilitación que se hagan en el futuro, deberían tener en cuenta la durabilidad. Igualmente, la regularidad superficial mejora sustancialmente la durabilidad de los firmes en cuanto a capacidad estructural ya que elimina los puntos de sobrecarga del firme causados por los vehículos pesados tras el paso de una irregularidad del pavimento.

7. Optimización de las propiedades de la capa de rodadura

Centrándonos en la superficie de rodadura, desde un punto de vista físico, cuanto más lisa fuese la misma, menor sería el esfuerzo necesario para hacer rodar los neumáticos. En términos prácticos, una superficie extremadamente pulimentada generaría problemas de seguridad vial, especialmente en condiciones de lluvia, razón por la que en el diseño de las capas de rodadura se exigen especificaciones de macrotextura y resistencia al deslizamiento. La mayoría de los estudios citados en apartados anteriores incluyen la macrotextura como un elemento que contribuye a aumentar la resistencia a la rodadura y, por lo tanto, incrementar el consumo de combustible. Sin embargo, un cierto nivel de macrotextura es necesario para incrementar la adherencia vehículo-pavimento en condiciones de lluvia. Por lo tanto, parece lógico que hay que conseguir un punto de equilibrio en las especificaciones de macrotextura de los pavimentos.

En diversos países europeos, se está prestando un especial interés al estudio del diseño y comportamiento de mezclas bituminosas con áridos de pequeño tamaño (proyecto OPTHINAL). El motivo de este interés está relacionado con el buen comportamiento que tienen desde el punto de vista de resistencia al deslizamiento unido a una baja generación de ruido.

De forma intuitiva podría parecer que el uso de áridos más gruesos en una mezcla bituminosa debe generar necesariamente una mayor resistencia al deslizamiento. La experiencia recabada en Francia con mezclas BBTM (Brosseaud et al. 2006) muestra la tendencia opuesta: al reducir el tamaño máximo del árido en la mezcla, la resistencia al deslizamiento se incrementa (Figura 4).

La posible explicación de este efecto es que las mezclas con menor tamaño de árido tienen una mayor área de contacto efectiva con el neumático, aumentando la resistencia al deslizamiento. Puesto que la macrotextura de una mezcla es necesaria para conseguir evacuar el agua superficial y mejorar de esta forma el agarre del neumático al pavimento y que las mezclas discontinuas con áridos de mayor tamaño suelen tener mayor macrotextura, lo que es perjudicial para la facilidad de rodadura del neumático, parece lógico que exista un punto de equilibrio entre ambos requisitos antagonistas. Así, sería necesario determinar la macrotextura mínima que se debe requerir a las mezclas bituminosas fabricadas con áridos de pequeño tamaño para que pudiesen optimizar simultáneamente la resistencia a la rodadura y la resistencia al deslizamiento. Desde un punto de vista económico y ambiental, la disminución del tamaño nominal del árido de las mezclas permite reducir sustancialmente el espesor de mezcla bituminosa a aplicar.

Actualmente se dispone de la tecnología y experiencia adecuada para diseñar mezclas en las que se puede optimizar el contenido de huecos (que controla la macrotextura) mediante el uso de ligantes de altas prestaciones que generan, además, mezclas con alta resistencia a la disgregación superficial, tal vez el mayor problema que deben afrontar las mezclas empleadas en capas de rodadura de carreteras con alta intensidad de tráfico.

Las normas UNE EN 13108 permiten tener en cuenta la mayor parte de estas consideraciones, por lo que sería interesante realizar pruebas a escala real que permitiesen la verificación y aplicación al caso español.

Las características superficiales de las carreteras ya no son sólo una cuestión de seguridad y confort

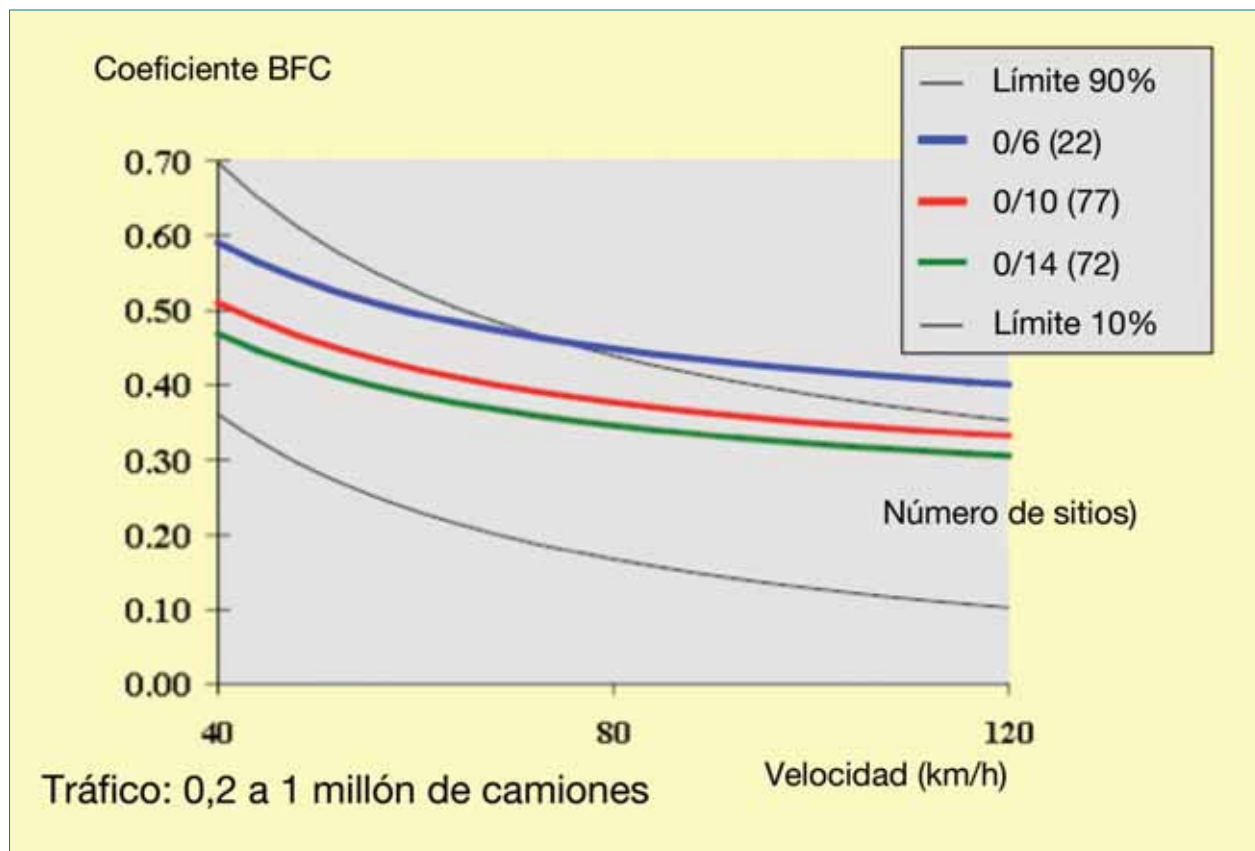


Figura 4. Influencia del tamaño nominal de árido de las mezclas asfálticas en la resistencia al deslizamiento.

9. Conclusiones

La conservación de los pavimentos se realiza actualmente teniendo en cuenta criterios que no consideran los impactos económicos y ambientales que el tráfico genera. Hasta hace poco, resultaba extremadamente difícil cuantificar estos impactos para poder compararlos con los generados por la realización de obras de conservación. Sin embargo, los numerosos estudios de ACV y ACCV que se están publicando proporcionan datos suficientes para poder abordar estos estudios con fiabilidad.

Las diversas experiencias internacionales existentes demuestran que la calidad de la rodadura de los pavimentos es un elemento muy destacado en los impactos generados por el tráfico de vehículo. Tanto la macrotextura como la regularidad superficial son los parámetros de control que permiten optimizar la resistencia a la rodadura de los vehículos.

Utilizando datos del mercado español, los periodos resultantes de retorno ambiental y económico son bastante cortos para las carreteras con alta intensidad de tráfico, por

lo que la conservación de las mismas debería hacerse teniendo en cuenta la resistencia a la rodadura que ofrece el pavimento.

Se debe evaluar cuál es el óptimo entre tamaño de árido, macrotextura y resistencia al deslizamiento para las mezclas recogidas en la normativa española, ya que así se podría mejorar la sostenibilidad de las carreteras aumentando, al mismo tiempo, la seguridad y el confort para los usuarios.

10. Bibliografía

- Brosseau, Y., Anfosso-Lédée F.: "French experiences with noise reducing thin layers". Technical Conference the Potential of Different Road Surface Designs in Road Traffic Noise Reduction. Madrid 2-3 October 2006.
- Buncher M. et al. "Perpetual Bituminous Pavements." Transportation Research Circular, number 503, December, (December 2001).
- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) "Summary of Pavement Smoothness Specifications in Ca-

nada and Around the World” Technical Brief 16, Canadian Strategic Highway Research Program, www.cshrp.org, Ottawa, Canada, 1999.

- Chappat L., Bilal J. “The environmental road of the future, life cycle analysis”. 2003
- Chatti K., Zaabar I.. “Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs”- NCHRP report 720.TRB 2012.
- Doseung, L. et al. “New pavement roughness thresholds to reduce dynamic truck loading”. 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions Delft. The Netherlands. June 16 - 20.2002
- EAPA. “Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements”. 2004
- ELLPAG Phase 1 and 2 reports. FEHRL 2009
- Hammarström U., Eriksson J., Karlsson R., y Yahya M.,:” Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface conditions”. VTI rapport 748A. 2012
- Hammarström, U., Karlsson R. y Sörensen, H.: “Road surface effects on rolling resistance – coastdown measurements with uncertainty analysis in focus. Deliverable D5(a) 2009.
- Karlsson R., Carlson A., y Dolk E.: “Energy use generated by traffic and pavement maintenance. Decision support for optimization of low rolling resistance maintenance treatments”. VTI notat 36A–2012
- Mapa de tráfico 2011. Principales resultados provinciales y nacionales del tráfico registrado en la RCE. Ministerio de Fomento
- National Asphalt Paving Association.” Pavement Smoothness”. Information Series 111, Lanhan, Maryland, 1996.
- OPTHINAL. Optimization of Thin Asphalt Layers. Danish Road Directorate. 2011
- Papagiannakis et al. “Impact of roughness-induced dynamic load on flexible pavement performance” . 1997 . Transport Research Report paper.
- Perera R.W., Byrum C, Kohn S.D. “Investigation of development of pavement roughness”. FHWA report RD 97-147.1998.
- Raymond C.M. et al “Analysis of Influences on As-Built Pavement Roughness in Asphalt Overlays”. FHWA Publication Number: FHWA-RD-03-049 November 2005.
- Sandberg U.: “Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods”. Report MI-RIAM_SP1_01.2011
- Sandberg, Ulf S. I.: “Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption”. ASTM STP 1031 page 460-479, USA 1990
- Stripple H.: “Life cycle assessment of Road. A pilot study for inventory analysis. Second revised edition”. IVL Swedish Environmental Research Institute. 2001.
- Wang T., Lee S., Harvey A., Kendal A., Lee E.B. y Kim C.: “ UCPRC life cycle assessment methodology and initial case studies on energy consumption and GHG emissions for pavement preservation treatments with different rolling resistance”. University of California research report UCPRC-RR-2012-02.
- Zhang, H., Keoleian, G., Lepech, M., and Kendall, A. (2010). “Life-Cycle Optimization of Pavement Overlay Systems.” J. Infrastruct. Syst., 16(4), 310–322.
- Guía de vehículos turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO2. IDAE. 12ª edición. 2013 (<http://www.idae.es/Coches/PDF/GuiaFinalN.pdf>)
- Precio actualizado de combustibles (<http://petromercado.com/precio-actualizado-combustibles.html>)