



**oficemen**  
Agrupación de fabricantes de cemento de España



# PAVIMENTOS DE HORMIGÓN:

## UNA ALTERNATIVA INTELIGENTE Y SOSTENIBLE

- Ventajas medioambientales de los pavimentos de hormigón
- Ventajas económicas de los pavimentos de hormigón
- Beneficios sociales de los pavimentos de hormigón
- Otras aplicaciones sostenibles del cemento y hormigón



1. Introducción	3
2. Ventajas medioambientales de los pavimentos de hormigón	4
• Huella de carbono y análisis del ciclo de vida (ACV)	
• Los pavimentos de hormigón reducen el consumo de combustible de los vehículos pesados	
• El uso de cementos que consumen menos energía	
• Reducción de CO <sub>2</sub> mediante la recuperación de residuos industriales	
• Secuestro de CO <sub>2</sub> por parte del hormigón	
• Ausencia de lixiviados	
• Reciclado	
• Mejor reflectancia de la luz y reducción del efecto de las islas de calor en entornos urbanos	
3. Ventajas económicas de los pavimentos de hormigón	14
• Vida útil, mantenimiento y costes asociados al análisis del ciclo de vida. Caso práctico: Comparación económica entre firmes bituminosos y firmes de hormigón en auto-vías	
• Comportamiento frente a situaciones climáticas y meteorológicas adversas	
• Costes de iluminación	
• Estabilidad del precio	
• Importancia de la competencia entre distintos tipos de pavimentos	
4. Beneficios sociales de los pavimentos de hormigón	18
• Menores demoras como resultado de un menor mantenimiento	
• Mejoras en la capa de rodadura aumentan la vida útil de la carretera	
• Comodidad en la conducción	
• Seguridad	
• Ruido	
5. Otras aplicaciones sostenibles del cemento y hormigón	24
• Una amplia gama de soluciones a favor de la movilidad	
• Seguridad frente al fuego en túneles	
• Técnicas de tratamiento de suelos, reciclado in situ de pavimentos e inmovilización de suelos contaminados	
• Pavimentos permeables	
• Pavimentos de hormigón que purifican el aire	
6. Conclusiones	28
Referencias	29

## Introducción

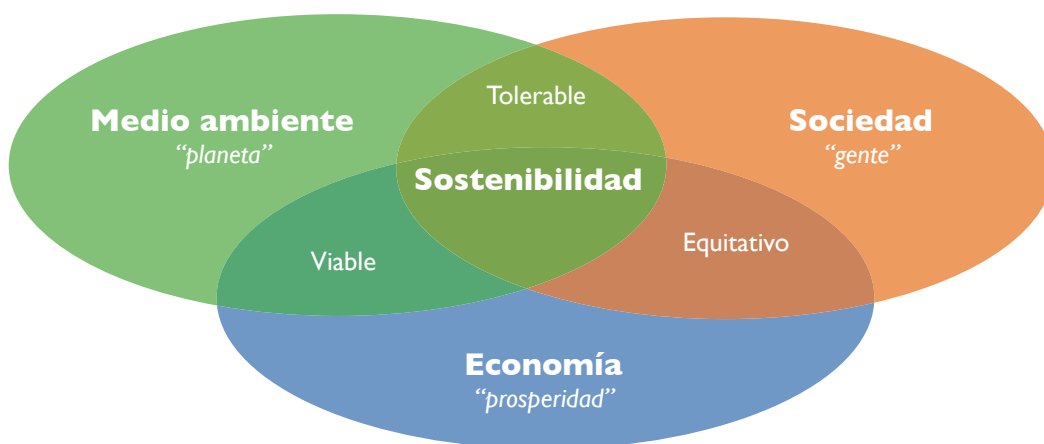
Actualmente, la sociedad consciente del desafío universal al que se enfrenta se pregunta cómo se debe adecuar nuestro estilo de vida y qué medidas se deben llevar a cabo para contrarrestar el calentamiento global y asegurar que las próximas generaciones puedan disfrutar de una buena calidad de vida. Esta es precisamente la definición de desarrollo sostenible, encontrar una respuesta a las necesidades actuales, al tiempo que se tienen en cuenta los factores económicos, ecológicos y sociales en todos los procesos de toma de decisión, de forma que sea posible satisfacer las necesidades del mañana. En nuestro sector hablamos de “construcción sostenible”.

Las estructuras y los pavimentos de hormigón tradicionalmente han sido identificados como duraderos, como reconocimiento a su robustez y a su larga vida útil. Sin embargo, actualmente hay otros aspectos que son igualmente relevantes y que deben analizarse con detenimiento con el objeto de alcanzar una evaluación global. Así se valoran aspectos como la obtención de materias primas, la producción, el proceso constructivo, las fases del ciclo de vida, la reutilización y el reciclado, para analizar la

durabilidad de los materiales no sólo en términos de su obtención y producción, sino que se trata de obtener una visión más amplia de la situación con el objetivo de encontrar soluciones sostenibles para el transporte de personas y mercancías.

En este ámbito, podemos aplicar la siguiente definición de sostenibilidad para las infraestructuras del transporte y para las carreteras en particular: *“Las carreteras sostenibles hacen un uso eficiente de los recursos naturales y respetan el medio ambiente durante todo su ciclo de vida; mejoran el transporte de toda la comunidad, prestan servicio a la sociedad en términos de movilidad, seguridad y comodidad mediante una elección inteligente basada en el diseño, la construcción, el mantenimiento y la demolición”*.

Esta publicación ha tenido en cuenta numerosas experiencias internacionales que demuestran que los pavimentos de hormigón pueden ser una solución sostenible para nuestra sociedad y que satisfacen los criterios de construcción sostenible en lo referente al medio ambiente, la economía y la sociedad.



Al hablar de desarrollo sostenible los aspectos medioambientales reciben normalmente mayor atención que los aspectos económicos y sociales. El efecto invernadero, el resultado del calentamiento global y el papel que juega el ser humano en ellos hacen que éstos se acentúen notablemente. No obstante, debemos preguntarnos ¿qué es “verde” y qué no lo es? Para contestar esta pregunta se utilizan diferentes métodos de evaluación. Así, por ejemplo, cuando se construye una carretera nueva, el proceso de licitación debe hacer uso de los principios de “Contratación Pública Ecológica” para valorar el impacto medioambiental de las diferentes alternativas. A continuación se exponen una serie de factores, unos más decisivos que otros, que pueden influir en la elección del pavimento.

### Huella de carbono y análisis de ciclo de vida (ACV)

La durabilidad de las estructuras de hormigón, principalmente su larga vida útil, juega un papel crucial en los tres aspectos de la construcción sostenible. Desde el punto de vista medioambiental se analiza la huella de carbono mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

La huella del carbono es la cantidad total de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de otras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (metano, óxido nítrico, gases fluorados) asociados a los productos en toda su cadena de suministro incluyendo su vida útil, el fin de la misma, la recuperación y eliminación. El  $\text{CO}_2$  es usado como gas de referencia y el resto

se expresan en función de su equivalencia con el  $\text{CO}_2$  en términos de “potencial de calentamiento global”.

La huella de carbono, que solamente tiene en cuenta el impacto en el cambio climático, es sólo una parte del enfoque global que supone el ACV, que calcula de una manera más completa el impacto medioambiental a lo largo del ciclo de vida, de la “cuna a la tumba”, utilizando un método normalizado (ISO 14040, ISO 14044). No obstante, la consideración en exclusiva de los gases de efecto invernadero podría tener un impacto negativo en otros aspectos medioambientales. Así, los sistemas de evaluación de impacto ambiental se deben llevar a cabo desde un punto de vista justo e integral para todas las fases de la estructura.

Dada su larga vida útil de 30, 40 e incluso más años, es evidente que el balance medioambiental de los pavimentos de hormigón es sumamente favorable para esta solución frente a otras alternativas. Además, los pavimentos de hormigón apenas necesitan operaciones de mantenimiento y reparación, sin mencionar el ahorro a largo plazo de materias primas, transporte y energía. Por otra parte, también se deben tener en cuenta los menores retrasos provocados por obras en la vía, que influyen en el consumo de combustible y en las emisiones de los vehículos.

Cimbéton, el Centro de Información del Cemento y sus Aplicaciones de Francia, solicitó al Centro de Energía de la Escuela de Minas de París un estudio aplicando el ACV para determinar el

Tabla 1: Potencial de calentamiento global de varios gases de efecto invernadero.

Nombre - Descripción	Fórmula química	Potencial de calentamiento global respecto a un periodo de 100 años
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	1
Metano	$\text{CH}_4$	25
Óxido nítrico (el gas de la risa)	$\text{N}_2\text{O}$	298
Gases hidrofluorocarbonados CFCs, HCFCs, HFCs, PFCs	-	124 – 14.800
Hexafluoruro de azufre	$\text{SF}_6$	22.800

Tabla 2: Indicadores medioambientales en el estudio de ACV de Cimbéton.

Indicador	Unidad
Energía primaria	MJ
Consumo de agua	kg
Recursos naturales	10 <sup>-9</sup> (Consumo comparado con las reservas mundiales)
Residuos	t eq.
Residuos radioactivos	dm <sup>3</sup>
PCG <sub>100</sub> (gases de efecto invernadero)	kg CO <sub>2</sub>
Acidificación	kg SO <sub>2</sub>
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Ecotoxicidad	m <sup>3</sup> eq. agua contaminada
Toxicidad para la población	kg eq. de peso contaminado
O <sub>3</sub> Contaminación	kg eq. C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Olor	m <sup>3</sup> eq. aire contaminado debido al amoníaco

comportamiento medioambiental de los pavimentos de hormigón respecto de los bituminosos.

Haciendo uso de los datos objetivos proporcionados por una universidad suiza y otra alemana, se comparó el impacto de seis firmes de carretera diferentes en función de doce indicadores medioambientales. Estos indicadores tienen un carácter global, tales como energía y gases de efecto invernadero, pero también hay variables de carácter local o regional tales como la contaminación, el olor, la acidificación, etc.



Hormigón en masa con pasadores.

Para el ACV se analizaron cuatro tipos de pavimentos de hormigón, un pavimento compuesto y un pavimento bituminoso empleado en una autovía, sobre la base de un tramo de un kilómetro de longitud y una vida útil de 30 años. El volumen de tráfico durante la fase de estudio fue de aproximadamente 100 millones de coches y 25 millones de vehículos pesados.

Los firmes analizados estaban constituidos de la siguiente manera:

- Nº 1: 21 cm de hormigón en masa con pasadores en las juntas sobre 15 cm de hormigón magro.
- Nº 2: 19 cm de hormigón armado continuo sobre 15 cm de hormigón magro.
- Nº 3: 22 cm de hormigón armado continuo sobre 5 cm de capa bituminosa.
- Nº 4: 37 cm de losas de hormigón sin juntas sobre 10 cm de capa de base sin tratar.
- Nº 5: 2,5 cm de capa bituminosa sobre 17 cm de hormigón armado continuo (HAC) y sobre 9 cm de una capa de base bituminosa.
- Nº 6: 8 cm de capa bituminosa sobre 26 cm de capa de base bituminosa.

Estos firmes están basados en experiencias francesas y por tanto no se corresponden necesariamente con las prácticas de otros países. A pesar de que existen diferentes hipótesis acerca de los materiales, el sistema constructivo, el mantenimiento y el reciclado, que están abiertas a la discusión, este estudio permite obtener una imagen global del tema.

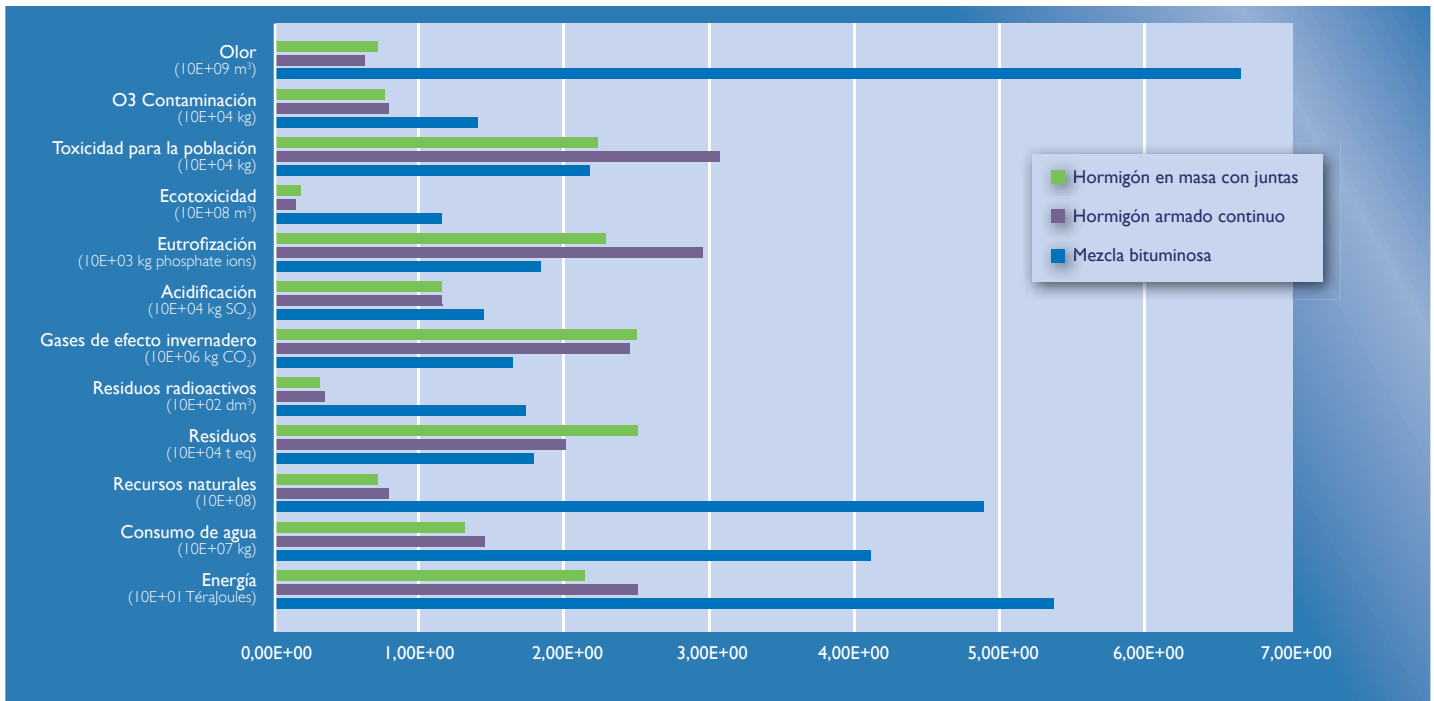
Los resultados se presentan en la Figura 1 mediante un gráfico de barras en el que se compara el comportamiento de los firmes según cada uno de los doce indicadores medioambientales. Cada barra usa una escala adecuada para la unidad de medida de cada uno de los indicadores y gracias a ello las diferencias entre los distintos firmes se pueden comparar de manera visual. No obstante esto no implica que puedan ser comparadas entre ellas ya que emplean unidades de medida completamente diferentes. Cuanto más pequeña sea la barra del indicador, menor es el impacto ambiental de la estructura sobre la variable analizada. Por otra parte, hay que señalar que el estudio no asigna ningún peso a los distintos indicadores medioambientales.



Hormigón armado continuo.

La Figura 1 compara el firme de hormigón nº1 (hormigón en masa con pasadores en las juntas), el firme de hormigón nº2 (hormigón armado continuo sobre una capa bituminosa) y el firme bituminoso nº6 en las fases de obtención de la materia prima, producción, preparación y transporte de las mezclas, construcción de los firmes, mantenimiento y deconstrucción al final de la vida útil. La fase real de uso o, dicho de otro modo, el impacto del tráfico no está incluido. Como puede observarse los firmes de hormigón son más favorables para los indicadores de Energía, Agua,

Figura 1: Impacto en varios indicadores ambientales, excluyendo el tráfico, durante la vida útil (30 años) de una carretera. Comparación de un pavimento de hormigón en masa con juntas, uno con hormigón armado continuo y otro bituminoso.



Recursos Naturales, Residuos Radioactivos, Acidificación, Ecotoxicidad, Contaminación y Olor; mientras que los firmes bituminosos son algo más favorables que los de hormigón en los indicadores de Residuos, Gases de Efecto Invernadero y Eutrofización.

Sin embargo, si además se analiza la fase de uso, es decir el tráfico, se obtiene un resultado completamente distinto tal y como se refleja en la Figura 2, que es aplicable a los firmes de losas de hormigón. Se puede observar claramente el pequeño porcentaje que representa la fase de construcción, mantenimiento y deconstrucción frente al impacto del tráfico. Así, con la única excepción del indicador de los "residuos sólidos", el impacto del tráfico es al menos diez veces mayor que el resto de fases del ciclo de vida de la carretera.

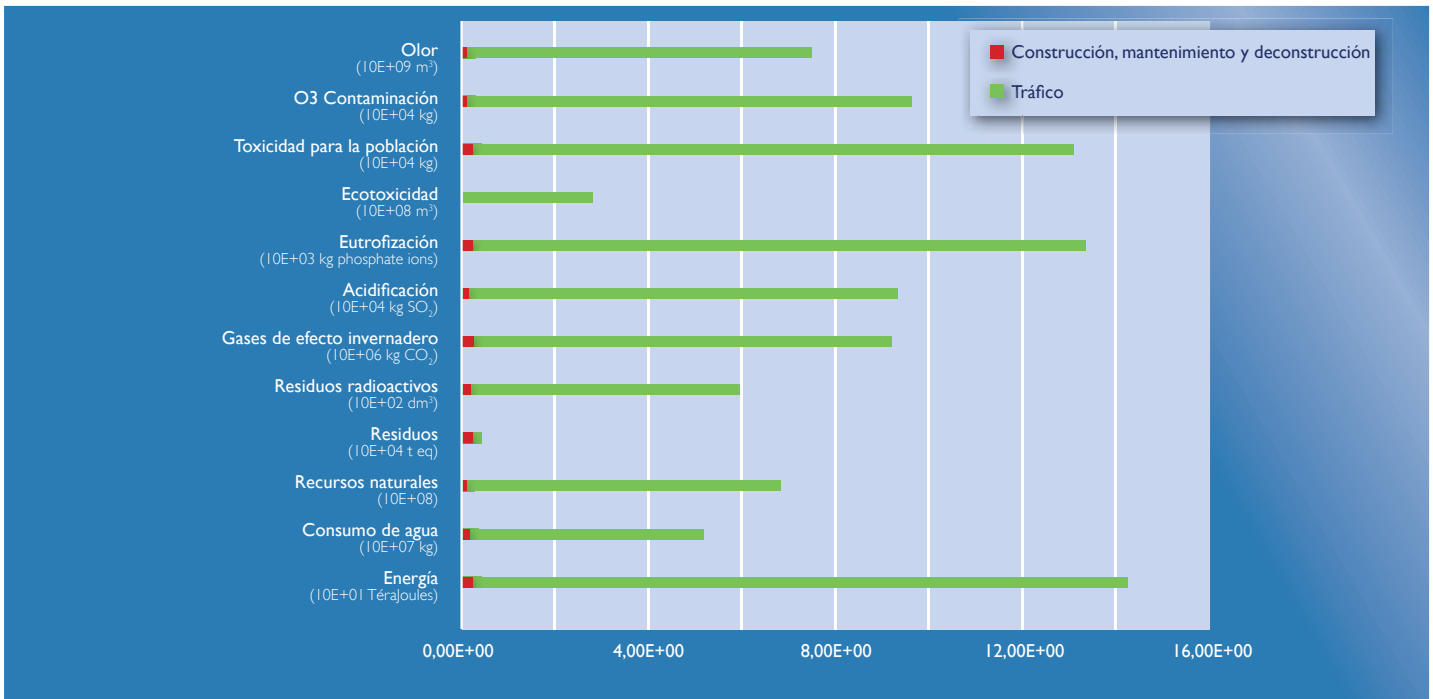
La Figura 2 pone de manifiesto que todas aquellas medidas encaminadas a reducir el consumo de combustible son de gran importancia y deben tenerse en cuenta al analizar los aspectos medioambientales de un firme. Dichas medidas podrían aplicarse en campos tales como:

- Combustibles alternativos.
- Tecnología de los automóviles (motores, neumáticos...).
- Regularidad superficial y rigidez del pavimento.
- Mediciones del tráfico.
- Fluidez del tráfico, congestión evitada.

Como hemos visto, la comparación entre varios firmes de carretera y/o tipos de pavimentos realizados según un ACV brinda una imagen más clara y real de los indicadores medioambientales. Independientemente de este caso, la optimización y mejoras deben ir dirigidas tanto al diseño, como a la construcción, las técnicas de mantenimiento, la deconstrucción y el reciclado.

Existen otras propiedades de los pavimentos de hormigón, tales como su gran reflectancia y reducción del efecto "isla de calor" en entornos urbanos, que no se han considerado en este estudio, aunque como veremos más adelante, juegan un papel importante en la lucha contra el cambio climático. No obstante, el consumo de combustible de los vehículos es una de las principales áreas de mejora.

Figura 2: Impacto de un pavimento de hormigón en masa con juntas durante el ciclo de vida (incluido el tráfico) según varios indicadores medioambientales.



## Los pavimentos de hormigón reducen el consumo de combustible de los vehículos pesados

La importancia social y ecológica que tiene la reducción del consumo de combustibles fósiles ha dado lugar a que se realicen diversos estudios y proyectos de investigación sobre la influencia del tipo de pavimento en el consumo de combustible de los coches y vehículos pesados.

El Consejo Nacional de Investigación de Canadá llevó a cabo cuatro estudios de investigación, que se ampliaron progresivamente con ensayos adicionales, sobre varios tipos de carreteras y con diferentes vehículos en las distintas estaciones del año, empleando varios modelos estadísticos. En todas las fases del análisis realizado, se observó un menor consumo de combustible de los vehículos pesados cuando transitaban sobre pavimentos de hormigón frente a cuando lo hacían sobre pavimentos bituminosos. La fase final, que fue la más completa y en la que se analizó un rango de carreteras con distinta regularidad y con mediciones en todas las estaciones del año concluyó que “el ahorro de combustible en los pavimentos de hormigón comparado con los pavimentos bituminosos, tanto para camiones en vacío como a plena carga está entre el 0,8 y 3,9% en cuatro de los cinco periodos del año analizados. Estos resultados se obtuvieron mediante un análisis estadístico con un nivel de fiabilidad del 95%”. Una media de ahorro de combustible del 2,35% no es despreciable y podría representar a lo largo de la vida útil de una carretera con tráfico intenso una diferencia importante en lo referente al consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes.

La investigación realizada por el TRL (Transport Research Laboratories) en Gran Bretaña por encargo de la Agencia de Carreteras se llevó a cabo para determinar el efecto de los pavimentos rígidos en el consumo de combustible. La menor deflexión de los pavimentos de hormigón significó una reducción del 5,7% de la resistencia al avance, lo que corresponde a un ahorro de combustible del 1,14%. Aunque esta diferencia pueda ser estadísticamente insignificante, podría haber sido mayor ya que las losas de hormigón usadas en los ensayos fueron construidas en laboratorio.

La regularidad y textura superficial son también factores importantes que influyen en el consumo de combustible. Así, la calidad del acabado superficial de un pavimento de hormigón juega un papel crucial, por lo que la regularidad del hormigón permite mantener sus prestaciones durante décadas mientras que un pavimento de hormigón con ondulaciones o con bacheados requerirá tratamientos difíciles y costosos para obtener la calidad de circulación deseada para reducir el consumo de combustible al mínimo.

### ¿QUÉ REPRESENTA UN 2% DE AHORRO DE COMBUSTIBLE PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS?

Supongamos que deseamos cambiar el carril de vehículos pesados de material bituminoso a hormigón. ¿Qué efecto podría tener un ahorro del 2,35% en las emisiones de CO<sub>2</sub>?

Imaginemos 1 km de calzada con 4 metros de ancho y 23 cm de espesor. En un día laborable es transitada por 2.000 camiones al día, con un consumo de combustible de 35 litros cada 100 km. Asumamos que 1 litro de combustible corresponde a 2,5 kg de emisiones de CO<sub>2</sub>.

- La emisión de CO<sub>2</sub> es la siguiente:  
 $220 \text{ días laborables} \times 2.000 \text{ camiones} \times 35 \text{ litros} / 100 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 2,5 \text{ kg/litro} = 380 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ por año.}$   
Un ahorro de combustible del 2,35% representa una reducción de 9,05 toneladas de CO<sub>2</sub> cada año.
- Por otra parte, el CO<sub>2</sub> que se necesita para fabricar el cemento de ese pavimento es:  
 $1 \text{ km} \times 4 \text{ m} \times 0,23 \text{ m} \times 350 \text{ kg de cemento/m}^3 \times 750 \text{ kg(*)}$   
 $\text{CO}_2 / 1.000 \text{ kg de producción de cemento} = 241,5 \text{ toneladas de CO}_2$

El CO<sub>2</sub> que se emite al hacer el cemento es compensado después de  $241,5 / 9,05 = 27$  años, cifra inferior a los antes mencionados 30 a 40 años de vida útil del pavimento de hormigón. Por lo tanto, a partir de año 28 de vida útil de un pavimento de hormigón, se produce un ahorro en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

(\*) Valor medio en Europa.





### El uso de cementos que consumen menos energía

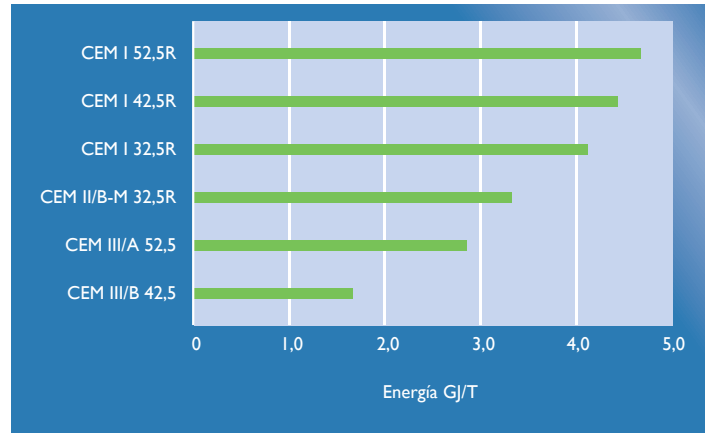
En el proceso de fabricación del cemento un 60% de las emisiones de CO<sub>2</sub> son causadas por la descarbonación de la caliza al producir el clínker y el 40% restante son debidas al proceso de combustión. Como media, los cementos fabricados en la UE generan 750 kg de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento producido.

No obstante, hay algunos cementos, como los empleados en la construcción de carreteras, que utilizan residuos de origen industrial como las cenizas volantes, las escorias siderúrgicas y el filler calizo como adiciones al clínker. Si se reduce el contenido de clínker de acuerdo con las normas de calidad, se reduce la energía necesaria para producirlo y por lo tanto las emisiones correspondientes, considerándose como cementos que consumen menos energía.

La Figura 3 muestra una comparación de la energía necesaria para la fabricación de varios tipos de cemento de diferentes clases resistentes. Al comparar el cemento con escorias de alto horno CEM III/A con el cemento Portland CEM I se puede observar que existe una reducción de aproximadamente un 40% en la energía eléctrica más la energía de la combustión.

Las menores emisiones de CO<sub>2</sub> que implica el uso de adiciones en la fabricación del cemento quedan reflejadas en la Figura 4 que proviene del proyecto

Figura 3: Energía necesaria para producir varios tipos de cemento de diferentes resistencias.



de cooperación internacional "ECOserve". Los datos han tenido en cuenta las reducciones de CO<sub>2</sub> como consecuencia de la disminución del consumo de combustible y electricidad, el menor CO<sub>2</sub> emitido durante la descarbonatación, así como las emisiones que se producen durante el secado de los materiales que se utilizan como adiciones y por la necesidad de realizar una molienda más fina del cemento.

Podemos observar que la producción de una tonelada de cemento con escorias siderúrgicas CEM III/A emite sólo 500 kg de CO<sub>2</sub>, lo que pone de manifiesto que se pueden obtener importantes ahorros en las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a la fabricación del cemento Portland CEM I.

Figura 4: Emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de cementos con adiciones.

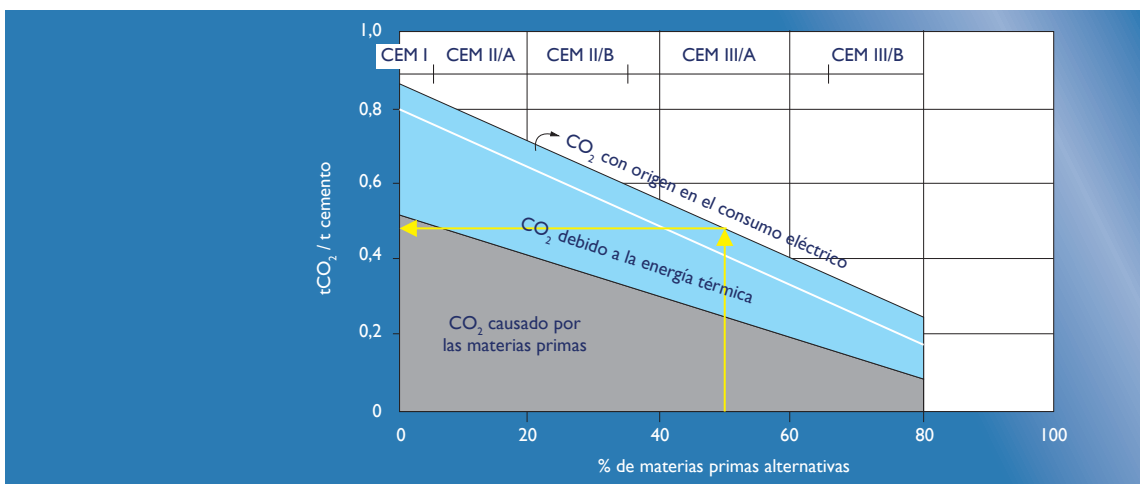
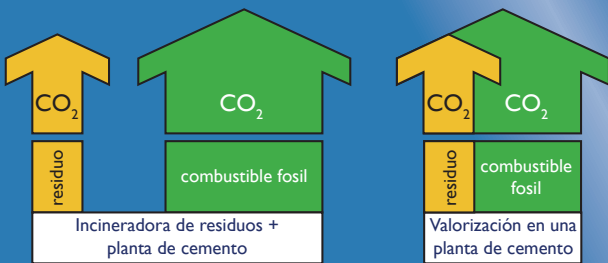


Figura 5: Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la valorización energética de residuos en un horno de cemento.



### Reducción de CO<sub>2</sub> mediante la recuperación de residuos industriales

La recuperación de residuos ofrece un alto potencial a la industria cementera para reducir las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Sin esta solución, los residuos o subproductos como neumáticos, disolventes, aceites, lodos de depuradora, etc. serían incinerados o llevados a vertedero donde emitirían gases de efecto invernadero.

En la Figura 5 puede observarse como la recuperación de residuos contribuye al ahorro de CO<sub>2</sub>. El coprocesamiento en las fábricas de cemento es una forma óptima de recuperación de la energía y la materia de los residuos que ofrece una solución segura para la sociedad y el medio ambiente ahorrando combustibles fósiles no renovables.

Además es necesario tener en cuenta que las emisiones de un vertedero contienen alrededor de un 60% de metano, un gas con un potencial efecto invernadero global 21 veces mayor que el del CO<sub>2</sub>.

### Secuestro de CO<sub>2</sub> por parte del hormigón

Como se ha visto anteriormente, durante el proceso de producción del cemento se emite CO<sub>2</sub> como resultado de la descarbonatación de la caliza. Como consecuencia de un proceso opuesto denominado recarbonatación, el CO<sub>2</sub> es capturado por el hormigón durante el transcurso de su vida útil.

Aunque la recarbonatación pudiera influir en algunas estructuras realizadas con hormigón armado hay que

recordar que los pavimentos de hormigón en masa con juntas no están armados y, por tanto, la recarbonatación no es perjudicial. En relación a los pavimentos de hormigón armado continuo, la armadura está a una profundidad de 6 o más cm, dependiendo del diseño. Esta profundidad es suficiente para asegurar que, durante la vida útil del pavimento, las armaduras no se van a ver afectadas por la recarbonatación.

Aunque el secuestro de CO<sub>2</sub> por parte del hormigón es limitado, ya que la profundidad de carbonatación (que es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición) solamente es de 5 a 10 mm después de un periodo de 40 años, implica un ahorro significativo como veremos a continuación.

Algunos estudios demuestran que la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado después de 40 años por un muro de 20 cm de espesor y expuesto por ambos lados es aproximadamente 20 kg por m<sup>3</sup> de hormigón. Una carretera de hormigón está expuesta solamente por una cara y por tanto el CO<sub>2</sub> capturado está en torno a 10 kg/m<sup>3</sup> ó 2 kg/m<sup>2</sup> para un espesor de 20 cm. Esto corresponde a un 5% del CO<sub>2</sub> necesario para la producción de un cemento con escorias siderúrgicas para la misma superficie de pavimento ( $1 \text{ m}^2 \times 0,2 \text{ m} \times 400 \text{ kg cemento/m}^3 \times 0,5 \text{ kg CO}_2/\text{cemento con escorias} = 40 \text{ kg/m}^2$ )

Si al final de la vida útil de la carretera el hormigón del pavimento se tritura, continúa existiendo un alto potencial para capturar CO<sub>2</sub> cuando los escombros se almacenan al aire libre. Como el área específica del hormigón triturado es mucho mayor y, por tanto, la reacción se produce más rápidamente, se pueden absorber entre 15 y 35 kg/m<sup>3</sup> en un período de 2 a 3 años.

Si analizamos el ciclo completo, concluimos que el total de CO<sub>2</sub> absorbido oscila entre 25 y 45 kg/m<sup>3</sup>



Con el almacenamiento al aire libre de los áridos reciclados se aumenta el secuestro de CO<sub>2</sub>.

para los pavimentos de hormigón, lo que representa aproximadamente entre el 10 y 25% de la cantidad total de CO<sub>2</sub> liberado durante el proceso de producción de 400 kg de cemento con escorias de alto horno necesarios para fabricar dicho hormigón.

### Ausencia de lixiviados

La lixiviación es un término técnico que se usa para describir el proceso por el cual los elementos químicos de un material sólido se liberan al entrar en contacto con el agua (agua potable, agua de lluvia, agua de mar).

El Instituto Nacional de Bélgica de Investigación Científica y Técnica de la Industria del Cemento (O.C.C.N – C.R.I.C) ha estudiado este tema. Usando el método del “Ensayo de tanque”, descrito en la norma NEN 7345, las muestras de hormigón fueron sumergidas en un líquido lixivante, el cual, después de un determinado periodo de tiempo, era sometido a un análisis ICP–MS (llama de plasma combinada con una espectrometría de masas). En los resultados de la Tabla 3 se observa que el com-

portamiento frente a la lixiviación de los firmes de hormigón, incluyendo el hormigón del pavimento y el hormigón magro, es completamente inocuo para el medio ambiente. De hecho, las cantidades de metales pesados liberados son muy inferiores a las que se liberan de forma natural en el agua mineral que se vende para consumo doméstico.

### Reciclado

El hormigón es un material inerte y 100% reciclable. La mayor parte de los pavimentos de hormigón demolidos son enviados a plantas de machaqueo. El hormigón triturado del pavimento se recicla como árido para la base y sub-base de firmes, para hormigón magro o para hormigón compactado con rodillo.

El reciclado del hormigón en pavimentos es perfectamente viable cuando se utiliza como árido en la base del pavimento. Además, se puede sustituir el 60% del árido grueso por árido reciclado procedente de un pavimento de hormigón. Esta es una práctica extendida en Austria y también utilizada en Alemania y Polonia, entre otros.

Tabla 3: Valores de lixiviados de un pavimento de hormigón y valores límite establecidos por la Directiva Europea.

“Ensayo de tanque” - Agua destilada - Hormigón con áridos porfídicos, CEM I y CEM III/A 42,5. Valores expresados en ppb (µg/l) (*) (**)					
Elemento	Niveles medios establecidos después de 24 horas en contacto				Valores límite en Europa según la Directiva 98/83/CE (***)
	CEM I	CEM III/A	Mínimo	Máximo	
Ba	6,4	22	8,0	8,8	0
Ni	0,19	0,45	0,096	0,28	20
Cr	0,31	0,71	0,13	0,29	50
Sb	0,011	0,028	0,010	0,068	5
Se	< 0,060	< 0,060	< 0,060	< 0,060	10
Mn	< 0,006	< 0,006	< 0,006	< 0,008	50
Hg	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	1
As	< 0,002	< 0,006	< 0,002	< 0,007	10
Ag	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,003	0
Zn	0,014	0,020	0,005	0,022	0
Pb	< 0,001	0,027	< 0,001	< 0,001	10
Cd	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	5
Cu	< 0,004	0,015	< 0,004	< 0,004	2.000

(\*) ppb = “partes por billón inglés” = e.g. microgramos por kilogramo o por litro de agua.

(\*\*) Los valores precedidos por el símbolo “<” indican que la concentración es inferior al límite detectable.

(\*\*\*) Los valores límite europeos se basan en la cantidad máxima diaria que un ser humano puede ingerir sin sufrir efectos secundarios.

## Rehabilitación de la N49/E34 en Zwijndrecht utilizando una capa superior de hormigón armado continuo y una capa inferior de áridos reciclados

La técnica de la doble capa de hormigón se utiliza bien para obtener una capa superior de elevada calidad o para permitir emplear materiales de menor calidad, es decir, más baratos, en la capa inferior o por ambas razones.

En Europa esta técnica se emplea mucho en Austria, donde el hormigón reciclado obtenido de la deconstrucción de pavimentos se utiliza en la base del firme. La creciente conciencia medioambiental y la voluntad innovadora condujeron a las autoridades flamencas a seguir el ejemplo de Austria y a construir un tramo piloto de 3 km con hormigón armado continuo en la vía rápida E34 en Zwijndrecht. Los trabajos se realizaron en dos fases, la calzada en dirección a Gante se realizó en 2007 y la calzada en dirección a Amberes en 2008.

Esta fue la primera y única vez a nivel internacional que se llevó a cabo una experiencia sobre un trazado existente, con una doble capa, una de hormigón armado continuo, y otra de áridos reciclados de hormigón. El objetivo de este diseño es durable y sostenible, ya que combina su elevada durabilidad con la preocupación por el medio ambiente y la escasez de los recursos naturales. Este proyecto, por lo tanto, se considera una solución óptima desde el punto de vista de la sostenibilidad y, sobre todo, representa una contribución para el futuro desarrollo de este tipo de pavimentos.



Trituración del material procedente de la demolición de un pavimento de hormigón para su empleo como árido en una base de hormigón compactado y en un pavimento de hormigón de nueva construcción (autopista A17-E403 Brujas – Kortrijk, Bélgica, 2007).

En Bélgica se llevó a cabo entre 2007 y 2008 la reconstrucción de un tramo de 3 km de la N49/E34 entre Zwijndrecht y Melsele.

### Mejor reflectancia de la luz y reducción del efecto de las islas de calor en entornos urbanos

La característica de reflejar la luz -o la energía- está determinada por el albedo de la superficie. El albedo es la relación entre la energía solar reflejada respecto de la energía solar total. Cuanto mayor es el porcentaje, mayor es la energía reflejada hacia la atmósfera. El albedo medio del planeta es de 0,35. Eso quiere decir que el 35% de la energía solar es reflejada mientras que el 65% es absorbida. Por este motivo, la temperatura media en la Tierra es de 15°C. El hielo de los polos con su elevado albedo juega un papel importante en el mantenimiento de este balance térmico. El albedo medio se reduciría si el hielo polar se derritiera, ya que el

Tabla 4: Valores de albedo de varios materiales.

	ALBEDO
Nieve en polvo	81 a 88%
Nieve prensada	65 a 81%
Hielo	30 a 50%
Roca	20 a 25%
Bosques	5 a 15%
Suelo expuesto	35%
Hormigón	15 a 25%
Asfalto	5 a 10%

océano absorbe más calor que el hielo. La temperatura de la Tierra aumentaría y el calentamiento global se aceleraría.

Sin embargo, el calentamiento global se puede ralentizar aplicando este conocimiento, principalmente disponiendo una mayor cantidad de superficies reflectantes tales como cubiertas blancas o pavimentos de hormigón. Este hecho ha sido estudiado por un grupo de científicos de Berkeley (California, USA), que se llamaron a sí mismos "Grupo Isla de Calor" (Heat Island Group). Compararon el efecto albedo y la influencia de la concentración del CO<sub>2</sub> de la atmósfera en la energía neta radiada responsable del calentamiento global. Calcularon que un incremento de un 1% del albedo en una superficie se corresponde con una reducción de la radiación de 1,27 W/m<sup>2</sup>. Esta reducción de la radiación tiene como efecto la ralentización del calentamiento global. Sus cálculos indican que este retraso en el calentamiento equivale a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2,5 kg por m<sup>2</sup> en la superficie de la Tierra.

Comparados con los pavimentos bituminosos, los pavimentos de hormigón suponen un incremento del albedo de entre un 10 y un 15%, lo que equivale a una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 25 a 38 kg por m<sup>2</sup>. Incluso el valor mínimo de 25 kg de CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> representa un gran beneficio, equivalente a un 60% del CO<sub>2</sub> requerido para la producción del cemento de un m<sup>2</sup> de una losa de hormigón de 20 cm de espesor.

Las superficies claras, como las de hormigón, absorben menos calor y contribuyen de esta forma a la

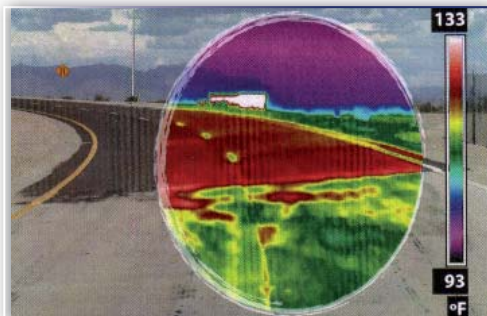
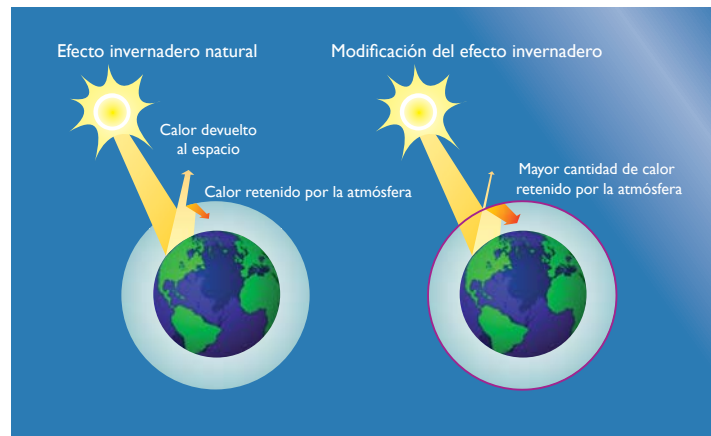


Figura 7: Imagen térmica de una carretera en Mesa, Arizona. La diferencia de temperatura entre el pavimento bituminoso de la parte trasera respecto del pavimento de hormigón de la parte frontal es sorprendente.

Figura 6: Calentamiento terrestre gracias al efecto invernadero.



reducción de los efectos de las islas de calor que se producen en las grandes áreas urbanas. La Figura 7 muestra una imagen térmica de un lugar donde se encuentra un pavimento de hormigón contiguo a un pavimento bituminoso. Estas mediciones fueron realizadas en condiciones ligeramente nubladas, aproximadamente a las 17:00 horas del mes de agosto de 2007. La diferencia de temperatura entre los dos pavimentos es de 11°C.

El efecto de isla de calor, ilustrado en la Figura 8, implica un mayor consumo de energía debido a la utilización de los sistemas de aire acondicionado de los edificios y, consecuentemente, tiene un alto coste económico y medioambiental, al tiempo que se incrementa la contaminación. En este contexto, los pavimentos de colores claros, como los de hormigón, pueden jugar un papel beneficioso ya que limitan el calentamiento y reducen la contaminación.

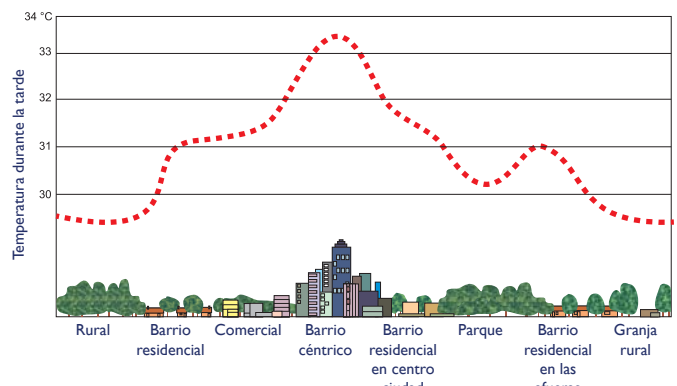


Figura 8: Ejemplo efecto de isla de calor en un entorno urbano.

Cualquier gestor de carreteras o autoridad competente desea invertir en firmes sostenibles que necesiten un mínimo mantenimiento y que ofrezcan una gran disponibilidad durante una vida útil más larga. En este sentido, y aunque los parámetros técnicos pueden ser decisivos en la elección de un pavimento, ésta también dependerá de aspectos económicos como los siguientes:

- Los gastos asociados a la construcción de la infraestructura o coste de capital.
- Los presupuestos de las obras de mantenimiento y conservación.
- La repercusión económica de las obras de mantenimiento, que principalmente son los costes sociales que representan las demoras por los atascos causados por los trabajos en la carretera y la reducción de la disponibilidad de la infraestructura.

### Vida útil, mantenimiento y costes asociados al análisis de ciclo de vida

Al analizar los aspectos económicos es frecuente considerar que el criterio principal de evaluación es el coste de inversión inicial y olvidar los excesivos gastos de mantenimiento que el pavimento puede tener durante su uso. En este sentido, la vida útil de los pavimentos juega un papel muy importante porque existen modelos matemáticos – e incluso probabilísticos – que pueden ayudar a tomar decisiones estratégicas en un contexto de restricciones presupuestarias a corto plazo.

El análisis de costes a lo largo del ciclo de vida (ACCV) es una de las técnicas utilizadas para la toma de decisiones porque que tienen en cuenta el retorno de las diferentes opciones de inversión a largo plazo. El resultado muestra la inversión que tiene el menor coste a largo plazo y que además proporciona las prestaciones deseadas.

La dificultad de esta técnica radica en conocer o estimar los parámetros que se requieren para el modelo como por ejemplo:

- La vida útil de las distintas opciones.
- Los costes para el gestor de la carretera.

- El valor residual del firme al final del periodo de análisis.
- El coste para los usuarios de la carretera (o coste social) durante el uso normal de la carretera y durante las obras de mantenimiento y rehabilitación, como los costes debidos a las demoras, los de accidentes, etc.
- Tasa de descuento.

Como son muchos los parámetros a evaluar, estimados con un grado de fiabilidad aceptable, el modelo de ACCV se puede completar con un análisis de riesgo. En este caso, generalmente se emplean modelos probabilísticos como la simulación de Monte Carlo o programas informáticos especializados.

No obstante, debido a la dificultad de cuantificar los parámetros sociales, normalmente sólo se consideran los costes de construcción y mantenimiento y, en ocasiones, los costes de demolición y reconstrucción.

### Comportamiento frente a situaciones climáticas y meteorológicas adversas

Aunque las condiciones climáticas condicionan la puesta en obra de un pavimento de hormigón, un firme de hormigón es capaz de soportar las condiciones climáticas más adversas.

Así, después de un severo invierno con ciclos de hielo-deshielo, el gestor de la carretera no debe hacer frente a la fisuración y los baches en la superficie o a cualquier otro tipo de rotura peligrosa.

### Costes de iluminación

La iluminación se establece en función de la cantidad de luz reflejada que es percibida por los conductores.

La mayor reflectancia del hormigón, debido a su superficie más clara, permite ahorrar en la iluminación de las calles y carreteras, colocando menos postes de iluminación o usando farolas de menor luminosidad.

Un estudio canadiense puso de manifiesto que para una calzada de hormigón es necesario disponer 14 postes de luz por kilómetro, mientras que se requieren 20 postes de luz para una bituminosa si queremos conseguir la misma intensidad lumínica.

### Estabilidad del precio

Si se analiza la evolución de los precios de los materiales de construcción, es evidente que los materiales importados como el fueloil y el betún dependen completamente del precio del petróleo en el mercado internacional y por ello están sujetos a mayores fluctuaciones, principalmente en períodos de escasez. Sin embargo, el cemento es un material de construcción de producción local con un coste más estable, aunque evidentemente también se ve afectado por los precios de la energía.

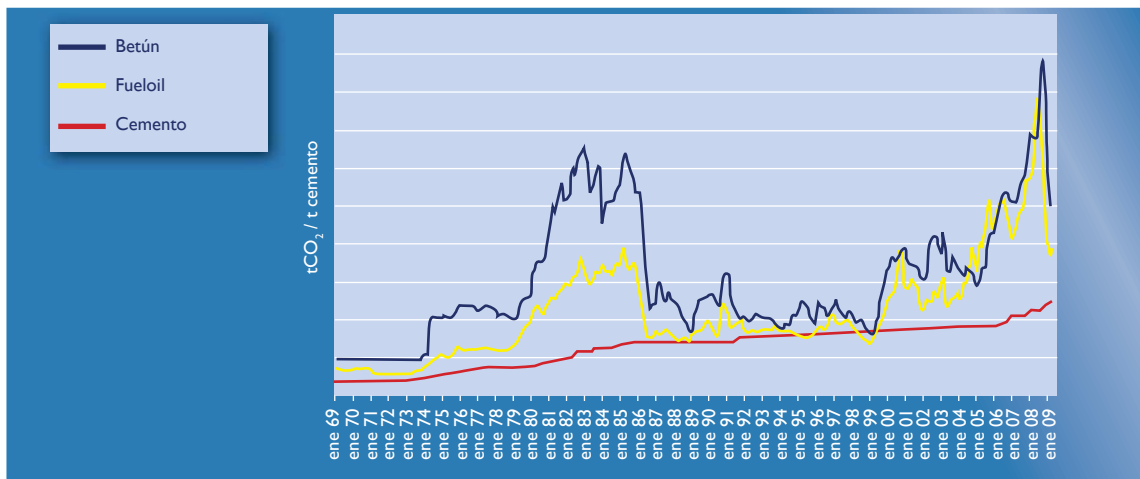
En la Figura 9 puede verse como en épocas de crisis caracterizadas por la carestía del petróleo el precio del betún alcanza valores impredecibles al alza, mientras que el cemento tiene menos fluctuaciones.

### Importancia de la competencia entre distintos tipos de pavimentos

Cuando la construcción de carreteras está dominada por uno u otro tipo de material se limita la competencia en el mercado y esta situación puede aumentar el precio de los materiales básicos.

Sin embargo, en países donde se desarrollan al mismo tiempo los pavimentos bituminosos y los de hormigón, el gestor de carreteras tiene la capacidad de seleccionar la opción más adecuada en función del tipo de obra, el volumen de tráfico y las condiciones de explotación, ya que no existe predominio de un material sobre otro, lo cual repercute positivamente en el mercado.

Figura 9: Evolución de los precios del betún, fueloil y cemento en Bélgica, entre 1969 y 2009.



### Caso práctico: Comparación desde un punto de vista económico entre un firme bituminoso y un firme de hormigón para carreteras

En 2001 la Administración de Carreteras de Valonia (Bélgica) publicó un estudio en el que se realizó la comparación entre diferentes pavimentos de hormigón armado continuo y bituminoso en función del análisis del ciclo de vida.

La principal virtud de este estudio es que está basado en más de 30 años de experiencia en la construcción y mantenimiento de dos tramos de carretera de 20 km en la E42 (Autopista de Valonia).

Características del estudio:

- Conversión a precios de 2001, con una determinada tasa de descuento.
- Análisis para un periodo de 50 años.
- Tráfico estimado basado en los aforos.
- Estimaciones precisas y actualizadas de los costes de construcción y mantenimiento de varios tipos de carreteras.
- Los escenarios de mantenimiento fueron realizados por un grupo de trabajo formado por los gestores locales de carretera.
- No se incluyó ningún coste indirecto para el usuario de la vía, por lo que todos los parámetros eran muy bien conocidos y el estudio puede considerarse como un trabajo extremadamente fiable en términos técnicos y económicos.

Se analizaron seis firmes diferentes, dos bituminosos y cuatro pavimentos de hormigón armado continuo.

El espesor total de los dos firmes bituminosos era diferente, 21 cm y 26 cm. En ambos casos la base consistía en 20 cm de hormigón magro y una subbase de 35 cm y 30 cm de zahorra respectivamente. El primero era un firme bituminoso convencional para autovías; el segundo era el resultado de aplicar un refuerzo sobre la autovía sin que se fresaran las capas inferiores.

Los cuatro firmes de hormigón difieren únicamente en el ancho de la calzada:

- 7,20 m de HAC con arcenes y mediana bituminosas (marcas viales en el arcén con el objetivo de que el HAC resista las cargas en los bordes).
- 8,00 m de HAC con arcenes y mediana bituminosa (marcas en el HAC para evitar los problemas en el borde).
- 10,30 m de HAC con la mediana bituminosa.
- 11,05 m de HAC en todo el ancho.

En los cuatro casos de HAC el espesor de hormigón era de 20 cm sobre una capa intermedia de 6 cm de mezcla bituminosa. La base era de 20 cm de hormigón magro y la subbase de 30 cm.

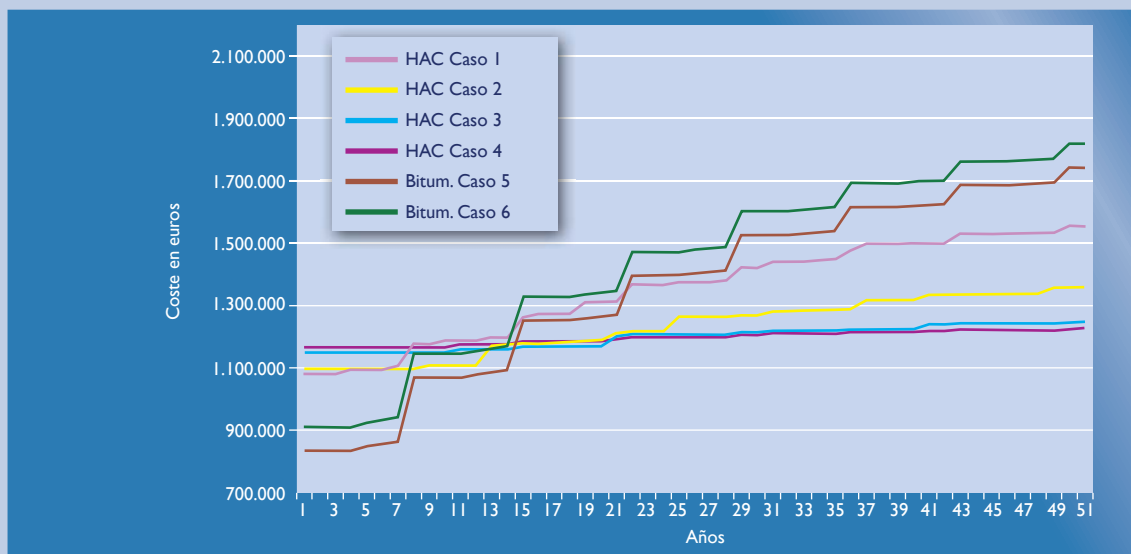
Los precios por m<sup>2</sup> se calcularon tomando como base la media de los precios unitarios de las distintas capas de los pavimentos de HAC, los arcenes y la mediana, y para los dos tipos de firmes bituminosos. El coste inicial de la inversión para 1 km de carretera (en ambos sentidos de circulación) para los diferentes firmes se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Coste de inversión inicial por km de carretera para pavimentos de hormigón armado continuo y para pavimentos bituminosos.

Caso N°	Descripción	Precio en € por km de carretera IVA incluido
1	HAC ancho = 7,20 m	1.080.215,30
2	HAC ancho = 8,00 m	1.097.909,27
3	HAC ancho = 10,30 m	1.148.779,42
4	HAC ancho = 11,05 m	1.165.367,51
5	Espesor de mezcla bituminosa 21 cm	833.749,24
6	Espesor de mezcla bituminosa 26 cm	909.458,45



Figura 10: Costes de construcción y mantenimiento de las autovías con pavimentos de hormigón armado continuo y pavimentos bituminosos.



Observamos una gran diferencia al analizar el coste de construcción de la capa de rodadura, la base y la subbase de estos tramos de carretera que varía entre 834.000 € a 1.165.000 €. Es conveniente destacar que este estudio se realizó cuando los precios del petróleo estaban en niveles bajos, un factor que juega a favor de los firmes bituminosos.

Los diferentes escenarios de mantenimiento se determinaron como resultado de la consulta realizada a los responsables de carreteras de dos distritos en función de su experiencia. Cada escenario da como resultado un coste de mantenimiento específico que se da con cierta frecuencia.

Los resultados se presentan en la Figura 10, calculados con una tasa de descuento del 3,6%, el máximo índice aplicable durante el periodo analizado.

En la Figura 10 se pone de manifiesto claramente la tendencia creciente del coste de mantenimiento de los pavimentos bituminosos.

Al inicio del séptimo año los firmes de hormigón empiezan a ser más ventajosos (Caso 2) y como muy tarde en el decimocuarto año todos los casos

tienen un menor coste global (construcción más mantenimiento).

Así se pone de manifiesto que a menor coste de la inversión inicial del asfalto no puede compensar los beneficios a largo plazo de los pavimentos de HAC.

Este estudio refuerza la decisión que tomaron las autoridades belgas cuando optaron por emplear soluciones con hormigón armado continuo para carreteras con mucho tráfico.



Autovía de Vallonia (Bélgica).

## Beneficios sociales de los pavimentos de hormigón

Además del medio ambiente y la economía, el desarrollo sostenible también contempla un aspecto social donde el bienestar y la seguridad son esenciales. Al ciudadano no le gusta sufrir grandes demoras debido a las obras de construcción, reparación y mantenimiento de las carreteras y espera que las autoridades realicen inversiones de calidad.

### Menores demoras como resultado de un menor mantenimiento

Los bajos requisitos de mantenimiento de los pavimentos de hormigón redundan en una menor cantidad de obras en la carretera durante la vida útil del firme. Esto se traduce en un menor número de intervenciones y en una disminución de las molestias a los conductores y a los vecinos de las comunidades próximas.

Un pavimento nuevo de hormigón convencional puede abrirse al tráfico entre 4 y 7 días después del curado y en el caso de reparaciones, la utilización de aditivos acelerantes del curado hacen que el hormigón endurezca en 3 días y en algunos casos en 24 horas. Esta técnica se utiliza en muchos países en las vías para tráfico importantes.

### Las mejoras en la capa de rodadura aumentan la vida útil de la carretera

Los pavimentos de hormigón con más de 40 años que aún están en servicio han originado un problema de imagen relacionado con la comodidad en la

conducción y el ruido porque estos aspectos eran secundarios cuando se construyeron y fueron ejecutados mediante técnicas y equipos hoy considerados obsoletos.

Los diseños modernos, los nuevos métodos constructivos, los mejores acabados de la capa de rodadura y las máquinas actuales hacen posible que hoy se puedan realizar carreteras con excelentes características superficiales que satisfacen las necesidades y los objetivos de los usuarios, vecinos de las vías y gestores de carreteras.

### Comodidad en la conducción

Para la ejecución de los primeros pavimentos de hormigón se utilizaban losas de gran tamaño (8 a 15 m de longitud) separadas entre sí mediante juntas de dilatación anchas (25 a 50 mm). Con estas características, las carreteras ofrecían bajos niveles de comodidad en la conducción a consecuencia de la anchura de las juntas y al escalonamiento que se producía como resultado de un daño localizado sobre una base que generalmente consistía en materiales susceptibles de erosionarse.

Desde el comienzo de los años setenta, estos problemas se resolvieron utilizando diseños que incluían las siguientes innovaciones:

- Losas más cortas (máximo 5 m de longitud) que dan lugar a que el hormigón sea menos susceptible a la fisuración.



- Juntas de contracción con cortes finos y sellados que limitan las molestias de las juntas al mínimo.
- Pasadores en las juntas transversales y bases tratadas con cemento que aseguran una excelente transferencia de las cargas y evitan el escalonamiento en las juntas.

El hormigón armado continuo, que se caracteriza por la ausencia de juntas transversales, se elige frecuentemente para autopistas y carreteras principales. En esta solución, la retracción del hormigón se absorbe mediante pequeñas microfisuras que no influyen ni en la regularidad superficial ni en la comodidad de la conducción.

Se pueden construir pavimentos de hormigón más regulares gracias a:

- La optimización de las mezclas de hormigón con una trabajabilidad constante y preparadas en una planta controlada por ordenador a pie de obra.
- La nueva generación de extendedoras equipadas con sistemas automáticos de control de los vibradores.
- La adecuada instalación de cables guía para controlar la maquinaria o sistemas inalámbricos que hacen uso de una estación total.
- El uso de un fratás oscilante longitudinal detrás de la máquina de acabado.
- Nuevos sistemas de medición de la regularidad superficial instalados inmediatamente detrás de la extendidora, permitiendo correcciones del proceso constructivo.

Con excepción de aquellos países en donde está permitido el uso de neumáticos con clavos, los pavimentos de hormigón son inmunes a la formación de roderas. Además, la regularidad longitudinal y transversal alcanzada en el proceso de construcción se mantiene durante muchos años.

Por otro lado, los daños debidos al efecto de las sales fundentes se evitan utilizando hormigones de buena calidad (contenido adecuado de cemento, baja relación agua cemento y empleo de aireantes). El descascarillado o fenómeno de pérdida de áridos de la superficie no es un problema en los pavimentos modernos de hormigón.

## Seguridad

La seguridad sigue siendo la variable más importante para la superficie de una carretera. Aunque la comodidad en la conducción es también un factor relevante, la resistencia al deslizamiento, el acuplating y la visibilidad son aún más significativos.

En relación al deslizamiento, una textura de la superficie con una adecuada fricción puede evitar accidentes, tanto en superficies secas como en mojadas. Se ha comprobado, en países donde existe tradición de carreteras de hormigón, que éstos no generan problemas desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento.

Así, hace algunas décadas se empleaba un ranurado transversal para el acabado de la superficie debido





a sus excelentes características frente a la fricción y al drenaje del agua, con el único inconveniente de que eran superficies ruidosas.

Otro tipo de textura superficial es el cepillado transversal o el paso de una arpillera, que presenta una buena resistencia inicial a la fricción pero que disminuye a lo largo del tiempo, especialmente en la etapa final de la vida útil.

Actualmente parece que la mejor solución son las superficies de árido visto ya que no muestran ninguna degradación significativa de la resistencia al deslizamiento con el tiempo. Desde mediados de los años noventa muchas carreteras principales (autovías y autopistas) y regionales fueron construidas con este acabado. El árido fino implica que el tamaño máximo del árido grueso está limitado a 20 mm y el árido fino (4 a 6 u 8 mm) constituye al menos el 20% del material granular (arena + áridos).

En las superficies con árido visto, aunque hay una disminución de los valores iniciales a lo largo del tiempo, tanto el coeficiente de rozamiento longitudinal como el coeficiente de rozamiento transversal se mantienen. El resto de valores registrados varían dependiendo de la estación del año en que se haya realizado el ensayo.

En las Tablas 6, 7 y 8 se indican algunos de los resultados obtenidos en la medición del coeficiente de rozamiento transversal usando el SCRIM en algunas



Textura transversal.



Autopista E40 (Bélgica) en 1972.

carreteras de Bélgica con acabados superficiales de árido visto.

Independientemente del tipo de acabado superficial, la durabilidad del rozamiento precisa del uso de los áridos correctos en la capa superior del pavimento. Deben cumplir todos los requisitos de resistencia a la abrasión, dureza y resistencia a las heladas. Una de las ventajas de los pavimentos de hormigón es que la resistencia al deslizamiento necesaria se alcanza inmediatamente después de colocarlos y además no se produce pérdida de árido fino.

La textura de los pavimentos combinada con su perfil transversal tienen una gran influencia en el acuaplaning (cuando los neumáticos de los vehículos pierden contacto con la superficie de la carretera). Como los pavimentos de hormigón no se ven afectados por la formación de roderas, la posibilidad de que esto suceda es prácticamente nula, siempre y cuando la pendiente transversal sea suficiente para evacuar el agua.

Otra causa de accidentes en épocas lluviosas es la reducción de la visibilidad causada por las salpicaduras y por las cortinas de agua delante de los vehículos. En este caso, las superficies de hormigón sin poros no pueden competir con las mezclas bituminosas poro-

Tabla 6, 7 y 8: Medición con SCRIM de la resistencia al deslizamiento en las autopistas A12, R3, A8 con acabado superficial de árido visto.

							2004 (3 años en servicio)	2008 (7 años en servicio)
A12 Bruselas – Amberes km 4,7 – km 6,5							0,59	0,51
A12 Amberes – Bruselas km 4,7 – km 6,5							0,62	0,51
	1997 (apertura)	1998	1999	2000	2001	2002	2004	
R3 Circunvalación de Charleroi km 27,0 – km 24,0	0,56	0,57	0,58	0,59	0,55	0,53	0,58	
				2000 (1ª medida)	2001	2002	2004	
E429-A8 Tournai - Bruselas km 25,0 – km 30,0				0,55	0,52	0,55	0,54	

sas o con un recubrimiento de hormigón poroso. No obstante, texturas transversales o acabados con árido visto con la suficiente profundidad en la textura superficial limitan las cortinas de agua en gran medida.

Finalmente, los colores claros en la superficie de hormigón contribuyen a mejorar la visión nocturna de los conductores.

### Ruido

Aunque el ruido del tráfico suele relacionarse con la comodidad de la conducción, es una de las

principales preocupaciones de las comunidades de vecinos, sobre todo en zonas urbanas donde la densidad de población es muy elevada. Varios estudios han demostrado que la limitación del ruido en origen, por ejemplo, en la superficie de la carretera, es la solución más eficaz desde un punto de vista económico. En los últimos años se han desarrollado diferentes acabados para reducir el ruido y se siguen realizando numerosos ensayos.

Aunque es cierto que los pavimentos de hormigón convencional no pueden lograr las reducciones de ruido alcanzadas con superficies porosas o capas



Acabado con árido visto.

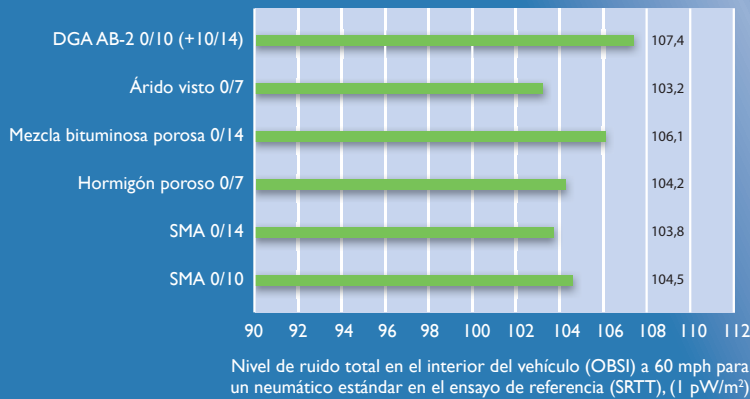
delgadas de mezclas bituminosas, el acabado con árido visto constituye una buena alternativa para conseguir una superficie de carretera silenciosa y segura. Con esta técnica los niveles de ruido en la rodadura son similares a los obtenidos por un microaglomerado SMA, pero se alcanzan no sólo inmediatamente después de su ejecución, sino a lo largo de la vida útil del pavimento.

Otra técnica efectiva consiste en disponer una textura longitudinal o en fresar con disco de diamante. Los mejores resultados se obtienen empleando dos capas de hormigón, en la que la capa superior contiene únicamente árido fino, por ejemplo con un tamaño máximo del árido de 6 a 8 mm. Indistintamente del tipo de reducción de ruido elegido, es

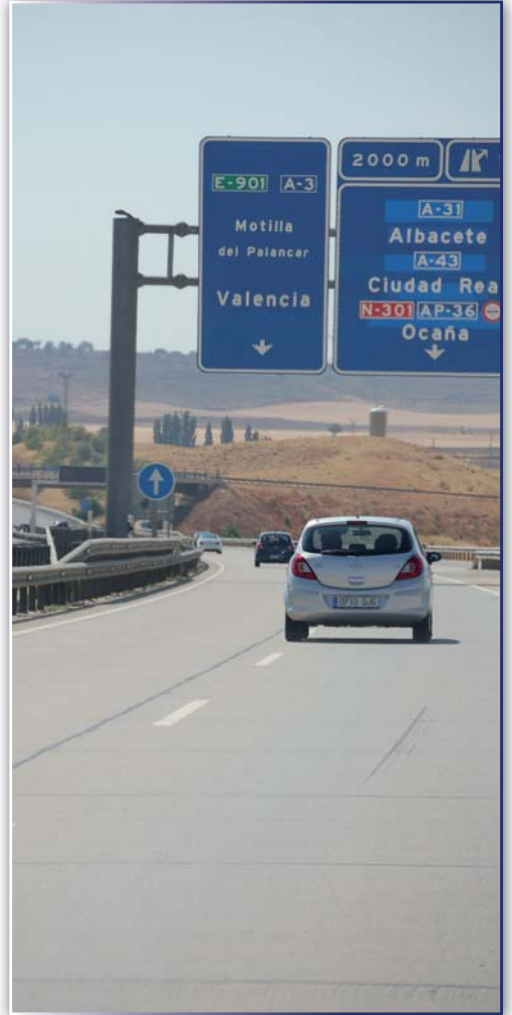
sumamente recomendable no hacer ninguna concesión en materia de seguridad.

En 1996 se construyó de forma experimental un pavimento de hormigón armado continuo (HAC) silencioso ejecutado en dos capas en Herne, Bélgica. Sobre una capa de 18 cm de HAC se colocaron diferentes tipos de capas de hormigón con árido fino visto, hormigón poroso, SMA y mezcla bituminosa porosa. Estos tramos de prueba estuvieron sujetos a varias mediciones y cálculos. Como puede verse en la Figura 11, después de 12 años de uso se concluyó que la capa superior compuesta de hormigón con árido fino visto tenía un mejor rendimiento a largo plazo (referencia 0/7) en lo referente al ruido y también era la más durable.

Figura 11: Herne – OBSI (CPX) ruido producido en diferentes superficies de carretera (resultados obtenidos por un equipo de EE.UU. en octubre de 2007).



Pavimento de HAC silencioso en Herne (Bélgica).



## Otras aplicaciones sostenibles del cemento y hormigón

### Una amplia gama de soluciones a favor de la movilidad

El uso de hormigón es esencial en numerosos proyectos de infraestructuras para alcanzar una movilidad sostenible en todos sus aspectos.

Algunas aplicaciones especiales en la construcción de carreteras son la ejecución de rotondas de hormigón en masa o de hormigón armado continuo.

Respecto al equipamiento de la carretera, las barreras de seguridad de hormigón, ya sean prefabricadas o construidas in situ, representan una solución adecuada, duradera y segura. Las barreras de seguridad de hormigón cumplen con la normativa

Europea (EN 1317), la cual especifica las características necesarias de las barreras de acuerdo a ensayos a escala real con vehículos, autobuses y camiones.

En el ámbito urbano, el uso del hormigón en adoquines o en soluciones de árido visto de diferentes colores mejora la apariencia visual de los cruces, las calles, los parques, etc. Así, las aceras de hormigón y los carriles bici satisfacen las necesidades de los usuarios más vulnerables de la vía.

También está aumentando el uso del hormigón como una solución sostenible para las infraestructuras de transporte público, ya sean autobuses, tranvías o trenes.





Los pavimentos de hormigón en vías rurales dan un servicio importante a la comunidad. Su rigidez permitió que en el pasado se pudieran construir sin necesidad de ninguna subbase y a pesar de los muchos años de uso y el poco mantenimiento realizado, aún satisfacen las necesidades de los vehículos pesados utilizados en la agricultura moderna.

Por último, los pavimentos de hormigón están biunívocamente unidos a túneles y viaductos, canales y



vías de navegación, pistas de rodaje y área de estacionamiento de los aeropuertos y las infraestructuras portuarias.



### Seguridad frente al fuego en túneles

Los beneficios de los pavimentos de hormigón destacan en el caso de los túneles: una larga vida útil, unas mínimas operaciones de mantenimiento y reparaciones, una superficie segura donde no se forman roderas o un color claro de la superficie, que mejora la visibilidad de los conductores y disminuye la necesidad de equipos de iluminación.



Una ventaja adicional del hormigón es su resistencia al fuego y la no generación de gases tóxicos cuando se calienta. Los pavimentos de hormigón no aportan carga de fuego y, por tanto, no constituyen un problema adicional en la evacuación de personas o en situaciones de emergencia. La elección del hormigón encaja perfectamente con la política de prevención de riesgos y limita las consecuencias en el caso de incendios en los túneles.



### Técnicas de tratamiento de suelos, reciclado in situ de pavimentos e inmovilización de suelos contaminados

El tratamiento de suelos in situ consiste en mezclar el suelo con un conglomerante (cemento, cal o un conglomerante hidráulico para carreteras) con el objetivo de mejorar o estabilizar la capa de suelo. La palabra estabilización se emplea cuando la mezcla puede soportar el agua y el hielo. Algunas de las posibles aplicaciones son en explanadas, subbases y, en algunos casos, bases cuando los firmes no tienen que soportar un tráfico excesivamente pesado.

La técnica de reciclado de firmes in situ consiste en triturar las capas granulares existentes, que pueden estar cubiertas o no por una mezcla bituminosa, y mezclarlas con cemento y agua si es preciso. En caso necesario, hay que añadir el material granular con el objeto de obtener una adecuada granulometría para combinarse con el cemento. El resultado que se obtiene es una mezcla tratada con cemento con una muy buena capacidad portante y una excelente resistencia a la erosión frente al agua y las heladas. Si se cubre con una o dos capas de mezcla bituminosa, se consigue un firme rehabilitado en toda su profundidad prácticamente sin transporte de materiales o movimiento de tierras. Es por tanto, una magnífica técnica para la rehabilitación de carreteras secundarias.

Una tercera aplicación es la inmovilización de residuos estabilizándolos con cemento. La contaminación de los suelos y del agua superficial por medio de metales pesados es uno de los mayores peligros para el medio ambiente y la salud pública y normalmente no es posible retirar y tratar el suelo y los materiales contaminados, bien por razones prácticas o financieras.

Los beneficios de estas técnicas se pueden resumir en:

- Rápida ejecución.
- Reducción o eliminación de costes de vertederos.
- Eliminación de la necesidad de disponer nuevo material granular.
- Reducción de la demanda de nuevos áridos y arena.
- Reducción de tráfico alrededor de la obra.
- Una solución económica para la capa responsable de la capacidad del firme.
- Una alternativa para gestionar los suelos contaminados.

### Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables, contruidos generalmente con adoquines permeables, constituyen una excepcional aplicación medioambiental. Permiten que las aguas de lluvia pasen a través de la superficie dentro de la estructura, que la almacena temporalmente y luego la elimina lentamente, ya sea en un suelo permeable, hacia una zona de filtración cercana o a un sistema de drenaje.

Las subbases permeables combinadas con pavimentos permeables pueden ayudar a evitar inundaciones mediante la reducción de la cantidad de agua que circula por los sistemas de drenaje. Incluso pueden mejorar la calidad del agua superficial reteniendo los elementos contaminantes en la base de la carretera.

Los pavimentos permeables se pueden construir utilizando pavimentos porosos o adoquines con juntas abiertas o con orificios de drenaje. El hormigón magro drenante ofrece una combinación ideal de estabilidad y permeabilidad para el material de la base.



Pavimento de un aparcamiento con adoquines permeables.



Estabilización de explanada con cemento.

## Pavimentos de hormigón que purifican el aire

La contaminación ambiental es un problema que está creciendo enormemente en áreas y ciudades con una densidad de población elevada. Los contaminantes más importantes debidos al tráfico son las partículas en suspensión, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el óxido nitroso. Cuando este último se presenta conjuntamente con COV forman ozono amplificando el impacto de las partículas en suspensión. Es por tanto necesario limitar las emisiones debidas al tráfico tanto como sea posible. Si bien es necesario limitar en primer lugar las emisiones de los propios vehículos, la carretera y sus alrededores también pueden contribuir:

Ciertamente se puede conseguir un efecto de purificación de aire mediante el uso de  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titanio) en la superficie de los pavimentos. Cuando se expone a la luz ultravioleta y, cada vez más también a la luz visible, el dióxido de titanio actúa como catalizador, convirtiendo los componentes nocivos como el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno (o  $\text{NO}_x$ ) en nitratos ( $\text{NO}_3$ ). Estos nitratos se quedan en la superficie y después son arrastrados por el agua de lluvia. Esto contrarresta el ciclo natural y los  $\text{NO}_x$ , que dan lugar a la formación de ozono, lluvia ácida y la acumulación de partículas en suspensión, son eliminados del aire rápidamente. Los materiales fotocatalizadores también pueden capturar del aire compuestos orgánicos nocivos disociándolos. El  $\text{TiO}_2$  se añade de forma separada a la mezcla de hormigón, o alternativamente se pueden formular cementos con  $\text{TiO}_2$  usando nanopartículas.

Varias investigaciones han demostrado en laboratorio el efecto del fotocatalizador. En estos ensayos se determina la conversión de los  $\text{NO}_x$  después de un único contacto entre el aire y el fotocatalizador. Se midieron reducciones de entre el 30 y 95%. La

eficacia en situaciones reales evidentemente no dependerá exclusivamente de la eficacia del material fotocatalizador en sí mismo, sino también del contacto (calidad del aire y tiempo de contacto) entre el aire y la superficie, la intensidad de la luz, la humedad relativa y la contaminación presente en el aire.

Una de las primeras ocasiones en las que esta tecnología se aplicó en la construcción de carreteras fue en 2004 – 2005, cuando las calzadas laterales del "Leien" de Amberes - una avenida urbana con tres carriles que forma un anillo semicircular alrededor del centro histórico de Amberes – fueron repavimentadas con 10.000 m<sup>2</sup> de adoquines de hormigón con dióxido de titanio en la capa superior:

Otras aplicaciones interesantes incluyen el uso de este material fotocatalizador en la capa superficial de un pavimento de hormigón bicapa o en los refuerzos delgados de hormigón. Así, en la Puerta de Vanves (Paris) se realizó una prueba en dos tramos de 300 m de una calle muy transitada con una intensidad de 13.000 vehículos al día, que fue repavimentada de la siguiente manera:

- Un tramo con pavimento de hormigón convencional.
- Un tramo con un refuerzo delgado de hormigón experimental en el que se empleó un cemento con acción fotocatalizadora.

Las mediciones de la calidad del aire y del agua de escorrentía sobre el pavimento se realizaron durante un año. Se observó que la contaminación de los gases  $\text{NO}_x$  se redujo en un 20% en condiciones atmosféricas desfavorables.

La investigación también reveló que la reacción del fotocatalizador se llevó a cabo no sólo con luz ultravioleta sino que también con luz ordinaria, abriendo la opción de disponer en los túneles revestimientos



Adoquines porosos.



Calzadas laterales del "Leien" de Amberes (Bélgica) con adoquines porosos.



## Conclusión

purificadores de aire combinados con la iluminación convencional.

La mayoría de los técnicos encargados de la toma de decisiones están convencidos de que, a largo plazo, las carreteras de hormigón muestran mayores beneficios y que en términos económicos son la solución más favorable cuando se considera el coste total de mantenimiento durante toda su vida útil. Esta afirmación se refuerza cuando se consideran los costes de los usuarios, ya que el hormigón requiere un mantenimiento mínimo y, por lo tanto, no provoca interrupciones a los usuarios de la vía.

No obstante, actualmente es de vital importancia demostrar que las carreteras de hormigón son beneficiosas para el medio ambiente y que pueden aportar soluciones aceptables para la sociedad en lo que a movilidad se refiere.

Los puntos fuertes de los pavimentos de hormigón han sido descritos desde la perspectiva de los tres pilares del desarrollo sostenible: el medio ambiente, la economía y la importancia social. Para evaluar el comportamiento de los pavimentos de hormigón

en función de cada uno de estos campos debe tenerse en cuenta todo el ciclo de vida del firme.

Desde esta perspectiva ha quedado demostrado que actualmente estos pavimentos son perfectamente compatibles con una filosofía de construcción sostenible, aunque existe margen para mejorar algunos aspectos. Se están llevando a cabo numerosas investigaciones y estudios como parte del proceso del desarrollo técnico de esta solución que además debe estar vinculada con las expectativas de la sociedad moderna.

Habida cuenta de la gran influencia de la vida útil en la sostenibilidad, es esencial que las características del hormigón como material y sus aplicaciones en la construcción de carreteras no se vean comprometidas por medidas que priorizan los beneficios medioambientales, económicos y sociales a corto plazo.

Apostar por los pavimentos de hormigón requiere la misma valentía, reflexión y visión a largo plazo que conlleva elegir una construcción sostenible.

Elegir carreteras de hormigón es optar por una solución sostenible.



- Aanpak van industrieel afval in cementovens vergeleken met verbrandingsovens. Een milieuvergelijking – FEBELCEM, Brussels
- AKBARI H. Global Cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub> – Heat Island Group, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, presentation at the fifth annual California Climate Change Conference, Sacramento, California, U.S., 9 September 2008
- BEELDENS A. Air purification by pavement blocks: final results of the research at the BRRC – TRA Conference, Ljubljana, Slovenia, April 2008
- BENBOW E., IAQUINTA J., LODGE R., WRIGHT A. Investigation of the effects of pavement stiffness on fuel consumption. – Published project report PPR 253, Transport Research Laboratory Limited, U.K., July 2007
- Beton en rationeel energiegebruik. Dossier Cement – FEBELCEM, Brussels, June 2005, [www.febelcem.be](http://www.febelcem.be)
- Béton et développement durable. Analyse du cycle de vie de structures routières – CIMbéton, Centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France 2005, [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)
- Bituminous and continuously reinforced concrete pavements for motorways – An economic comparison – Les cahiers du MET Nr. 24, Walloon Ministry for Infrastructure and Transport, General Directorate of Motorways and Roads, Namur, 2006, <http://routes.wallonie.be>
- BRIESSINCK M., RENS L. Oppervlakkenmerken van hedendaagse betonverhardingen – Contribution to the Belgian Roads Congress, Ghent, 2009
- CAESTECKER C. Test sections of noiseless cement concrete pavements. Conclusions, Vilvoorde, 1999
- Carbon Footprint – what it is and how to measure it – European Platform on Life Cycle Assessment, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2007, <http://lca.jrc.ec.europa.eu>
- Cement, beton en CO<sub>2</sub>. Feiten en trends – Cement&BetonCentrum, 's Hertogenbosch, Nederland, 2008, [www.cementenbeton.nl](http://www.cementenbeton.nl)
- Concrete thinking in transportation solutions – Cement Association of Canada, Ottawa, Canada 2007, [www.cement.ca](http://www.cement.ca)
- DEBROUX R.; DUMONT R. Twin-layer continuously reinforced concrete pavement on the N511 at Estaimpuis (Belgium): an investigation of the optimisation of surface characteristics", 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colorado, U.S., 2005
- De bijdrage van de cementindustrie tot de beperking van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, FEBELCEM, Brussels, 2007
- Enlightened – American Concrete Pavement Association, U.S., 2006, [www.pavement.com](http://www.pavement.com), [www.pavements4life.com](http://www.pavements4life.com)

FILFE M., FRIEND R., SCHIAVONI P. Etude comparative des facteurs socio-économiques relatifs aux chaussées en béton et en asphalte – Rapport final – Groupe-conseil KPMG S.E.C., Montréal (Canada), June 2000

Green Highways. Environmentally and Economically Sustainable Concrete Pavements – American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 2007, [www.pavement.com](http://www.pavement.com)

General guidelines for reducing CO<sub>2</sub> in civil engineering works – European Concrete Platform, 2009, [www.europeanconcrete.eu](http://www.europeanconcrete.eu)

Improving Fire Safety in Tunnels – CEMBUREAU, Brussels, 2004

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

KENDALL A., KEOLEIAN G.A., LEPECH M.D. Materials design for sustainability through life-cycle modeling of engineered cementitious composites – Materials and Structures 41 : 1117-1131, RILEM 2008

KJELLEN K.O.; GUIMARAES M.; NILSSON A. The CO<sub>2</sub> balance of concrete in a life-cycle perspective – Nordic Innovation Centre, December 2005

Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions, Pavement Division Interim Technical Bulletin, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, U.S., September 1998

MARION A.-M.; DE LANEVE M.; DE GRAUW A. Onderzoek naar het uitlogingsgedrag van wegenbeton: kwantificering van de hoeveelheden zware materialen uitgelooft tijdens de "Tank Test" – Verslag OCCN 1999-2000, pag. 5-24, Brussels, 2001, [www.cric.be](http://www.cric.be)

MARION A.-M., DE LANEVE M., DE GRAUW A. Onderzoek naar het uitlogingsgedrag van schraal beton: kwantificering van de hoeveelheden zware materialen uitgelooft tijdens de "Tank Test" – Verslag OCCN 2001-2002, pag. 3-21, Brussel, 2003, [www.cric.be](http://www.cric.be)

MULLER Ch. Blended cements – German Cement Works Association VDZ, presentation at the ECO-Serve Seminar "Challenges for Sustainable Construction: the Concrete Approach", Warsaw, May 18-19, 2006, [www.eco-serve.net](http://www.eco-serve.net)

POMERANTZ M., BON. P., ABKARI H., CHANG S.-C. The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities – Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Canada 94720, April 2000, <http://heatisland.lbl.gov>

SNYDER M. B. Pavement Surface Characteristics – A Synthesis and Guide, American Concrete Paving Association ACPA, Skokie, Illinois, U.S., 2006

Sustainable Cement Production. Co-Processing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry – CEMBUREAU, Brussels, 2009, [www.coprocessing.info](http://www.coprocessing.info)

TAYLOR G.W., FARREL P, WOODSIDE A. Effects of pavement structure on vehicle fuel consumption. Phase III – prepared for Natural Resources Canada Action Plan 2000 on Climate Change and Cement Association of Canada by the National Research Council of Canada, January 2006

THIERY M.; ROUSSEL N., HABERT G., BELIN P, DANGLA P. Comment intégrer quantitativement la carbonatation atmosphérique dans le bilan-carbone des matériaux cimentaires – AFGC, Paris, March 2009





Publicado por:

**EUPAVE**  
European Concrete Paving Association  
Vorstlaan 68, Boulevard du Souverain  
1170 Bruselas, Bélgica  
T.: +32 2 790 42 06  
F.: +32 2 640 06 70  
info@eupave.eu  
www.eupave.eu



Agrupación de fabricantes de cemento de España

**OFICEMEN**  
Agrupación de Fabricantes de Cemento de España  
C/ José Abascal, 53 – 1º  
28003 Madrid, España  
T.: +34 91 441 16 88  
F.: +34 91 442 38 17  
info@oficemen.com  
www.oficemen.com



**IECA**  
Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones  
C/ José Abascal, 53 – 2º  
28003 Madrid, España  
T.: +34 91 442 93 11  
F.: +34 91 442 72 94  
tecnico@ieca.es  
www.ieca.es

● **Autor:** Luc Rens (Febelcem, Bélgica)  
**Traducción al español:** César Bartolomé (Oficemen, España)  
Carlos Jofré (IECA, España)

● **Fotos:**  
**FEBELCEM**  
**C.R.I.C**  
**OCW-CRR**  
Agentschap Wegen en Verkeer  
photo-daylight.com  
A. Nullens (portada)  
Cement&BetonCentrum – W. Kramer  
vwb foto  
P. de Koning  
R.W.S. – J. van Houdt