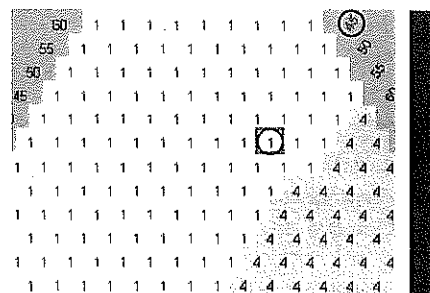


Modelo de apoyo a las decisiones para firmes basado en el coste total durante la vida útil, la evaluación del ciclo de vida y el análisis multicriterio



Decision support model for road pavements based on whole life costing, life cycle assessment and multi-criteria analysis

Adrian J. VAN LEEST

Plataforma Tecnológica CROW (Países Bajos)

Steeff B. VAN HARSTKAMP

Provincia de Brabante del Norte (Países Bajos)

Joep P.R. MEIJER

theRightenvironment (EE.UU)

RESUMEN

En respuesta a la importancia creciente que tienen las actividades, las compras y la construcción de carácter sostenible, los diseñadores, consultores y gestores de pavimentos ahora tienden a adoptar decisiones más racionales que antes ponderando los pros y los contras de la construcción, el mantenimiento y la gestión de los diversos tipos de firmes de carreteras.

Los firmes bituminosos y de hormigón ofrecen ventajas específicas que se han de comparar cuando se estudia la alternativa óptima para un firme de larga duración. Las decisiones financieras se toman en base a un análisis de los costes totales durante la vida útil, pero existen otros aspectos importantes que son de difícil cuantificación. Factores como los riesgos de construcción, la necesidad de mantenimiento y su impacto sobre la accesibilidad, la congestión, la seguridad para los usuarios de la carretera y las emisiones energéticas se han de calificar y ponderar cuando se lleve a cabo una comparación exhaustiva del comportamiento de los firmes.

Un grupo de estudio de CROW ha desarrollado un modelo de apoyo a las decisiones que se puede utilizar para tener en cuenta los factores económicos, técnicos, medioambientales y de otra naturaleza cuando se elija un determinado tipo de firme de carretera. Junto con los materiales tradicionales para firmes que se pueden tener en cuenta, también se encuentran disponibles en la base de datos nuevos materiales como los materiales ligeros para terraplenes, mezclas bituminosas en frío, el hormigón reforzado con fibra de acero y el hormigón con áridos reciclados. Este documento describe la metodología empleada y ofrece tres ejemplos de la aplicación del modelo en los Países Bajos.

Palabras clave: Pavimento, Vida útil, Coste total, Análisis multicriterio, Análisis del ciclo de vida, Construcción sostenible, Impacto medioambiental, Modelo de apoyo a las decisiones.

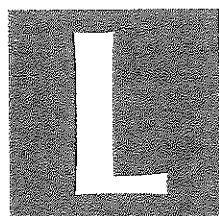
ABSTRACT

In response to the growing importance of sustainable undertaking, purchasing and building, designers, consultants and pavement managers now tend to make more rational decisions than before when comparing the pros and cons of the construction, maintenance and management of various types of road pavements.

Asphalt and concrete pavements offer specific advantages that need to be compared when selecting the most favourable option for long-life pavements. Financial decisions can be based on an analysis of whole life costs, but other important aspects are more difficult to quantify. Factors such as construction risks, the need for maintenance and its impact on accessibility, congestion, road user safety and energy emissions must be qualified and weighted when conducting a comprehensive comparison of pavement performance.

A CROW study group has developed a decision support model that can be used to take into account economic, technical, environmental and other factors when selecting a certain type of road pavement. Besides the traditional road pavement materials that can be taken into account, also new materials like light-weight embankment materials, low temperature asphalt, steel fibre reinforced concrete and concrete with recycled aggregates are available in the materials database. The paper describes the methodology used and presents three examples of the model's application in the Netherlands.

Key words: Pavement, Lifespan, Total cost, Multicriteria evaluation, Lifecycle analysis, Sustainable construction, Environmental impact, Decision support model.



Los Países Bajos tienen una gran experiencia en el diseño de firmes de carretera. Cuando se selecciona un pavimento, a menudo se dispone de diversas soluciones que cumplen las condiciones técnicas iniciales, como la capacidad de soporte, la durabilidad, la seguridad y la sostenibilidad.

En los últimos años (en parte dentro del contexto actual de actividades, compras y construcción sostenibles) se ha tenido en cuenta un número creciente de factores a la hora de seleccionar el firme, como son los costes (incluido el mantenimiento), el impacto medioambiental, el valor ecológico y el impacto sobre el paisaje. La incorporación de estos factores al proceso de toma de decisiones complica la tarea de elegir la solución óptima.

El *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* se desarrolló bajo la gestión de CROW para identificar con claridad los factores antes citados. Se ha desarrollado un programa informático para Microsoft Excel⁽²⁾ que se basa en este modelo y que está destinado a asistir a los usuarios. Este modelo objetivo y transparente se puede utilizar para elegir entre una serie de firmes: bituminoso, de hormigón o de adoquines. El modelo se ha actualizado en 2008 con nuevos materiales como los de peso ligero destinados a terrapienes y

mezclas bituminosas en frío, que están disponibles ahora en la base de datos de materiales.

El objetivo de este documento consiste en presentar y publicar la metodología para ponderar los diversos criterios de decisión en la búsqueda del pavimento para carretera más favorable cuando se evalúen costes, impacto medioambiental y otros factores. Se considera que es un modelo objetivo decidir entre varios materiales para carretera para los diversos tipos de carreteras (desde autopistas hasta carriles bici) con el fin de determinar el *coste total para la propiedad* durante la vida útil.

OBJETIVOS DE DESARROLLAR UN MODELO DE APOYO A LAS DECISIONES PARA LOS FIRMES

En los últimos años tanto las administraciones de carreteras como los contratistas y los consultores han adoptado decisiones con el fin de encontrar la *mejor* solución para el firme de un determinado proyecto teniendo en cuenta sus circunstancias. Sin embargo, no ha existido algo similar cuando se trata de un enfoque o metodología uniforme o universal para ponderar los diversos criterios, agregarlos y decidir qué se hace.

Por una parte, esto atañe a los aspectos técnicos y económicos, por otra parte, también se han de tener

en cuenta otros factores que son difíciles de cuantificar. Como ejemplos tenemos: emisiones de CO₂ durante la producción y construcción de materiales para firmes (efecto invernadero), nivel de vibración y sonoro en situación de servicio, medidas del tráfico y costes derivados de la congestión debidos al mantenimiento, la movilidad de las personas y la disponibilidad de la carretera, aspectos medioambientales globales y locales.

La disponibilidad de datos fiables sobre el impacto medioambiental es limitada y a menudo es la propia industria quien los facilita. Por decirlo de alguna manera, ésta no es la fuente de información más objetiva. Las administraciones de carreteras en ocasiones tienen distintos departamentos para la obra nueva y para la conservación/rehabilitación y también los presupuestos para estas dos actividades son independientes. Algunos contratistas prefieren suministrar lo que ellos quieren, no lo que el cliente necesita.

Así las cosas, esto no facilita que se alcance una decisión objetiva e integral sobre firmes. Éste fue el motivo más importante para que CROW y los participantes en el mercado desarrollasen un modelo uniforme y transparente de apoyo a la toma de decisiones destinado a los ingenieros de firmes y a los políticos.

El *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* está diseñado para permitirles a los ingenieros de carreteras, gestores, consultores y a quienes tomen las decisiones perfilar con claridad y tener en cuenta factores como el impacto medioambiental, que se determina aplicando *análisis del ciclo de vida (LCA)*, efectos de los costes basados en el coste a lo largo del ciclo de vida (LCC) y las consecuencias de cualquier otro factor al comparar las diversas estructuras de los firmes (alternativas de diseño). El modelo se debería utilizar al comienzo de la fase de diseño geométrico y estructural de la construcción o rehabilitación, en el momento de elegir los materiales del firme y de determinar los espesores de la capa.

Con este modelo se puede llevar a cabo una comparación de los tipos de firme para todo tipo de carreteras, incluyendo autopistas, carreteras nacionales, provinciales, comarcales y carriles bici. Para ello, el usuario debe introducir los datos sobre la composición del pavimento, la subbase y la base granular para el tipo de carretera en cuestión (Figura 1). Sin embargo, el programa incluye estructuras de firme para carretera predefinidas.

Structure/layer	Volume (m³)	Unit price (€/m³)	Environmental score	Quality
Removal of existing pavement				
Concrete cracking and sawing (ready for reuse)	0,230		1,2E+02	0%
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
New pavement				
Concrete CARAC, Cawela + tiecure	0,200	2,0%	2,9E+05	100%
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
Base course				
double click to select material	0,000			
double click to select material	0,000			
Sand subbase				
double click to select material	0,000			
TOTAL			2,9E+05	

Figura 1. Datos sobre la estructura del pavimento.

METODOLOGÍA DEL MODELO DE APOYO A LAS DECISIONES

El programa calcula los costes tipo (de inversión, mantenimiento, rehabilitación y demolición), el impacto medioambiental y otros factores utilizando los datos que introduzca el usuario sobre el tipo de carretera, el espesor del firme, los materiales y otros criterios. Eso significa que antes de comparar las puntuaciones, los datos se deben convertir en primer lugar en unidades comparables (estandarización). El modelo de apoyo a las decisiones logra esto dividiendo la puntuación de cada criterio por la puntuación máxima generada para las alternativas de diseño introducidas.

El impacto medioambiental se calcula utilizando el método *TWIN²⁰⁰²*. Este método, que ha sido creado por el Instituto holandés de biología y ecología de la construcción⁽⁴⁾, cuantifica todas las consecuencias medioambientales expresándolas como un solo número. Además de los datos cuantitativos derivados de los estudios de LCA medioambientales, el método *TWIN²⁰⁰²* también tiene en cuenta datos no cuantificables, lo que permite una evaluación exhaustiva de las estructuras, de los productos de construcción y de los componentes.

El hecho de que este método pueda valorar tanto los datos cuantificables (por ejemplo, las emisiones) como los aspectos cualitativos (por ejemplo, las molestias para los usuarios de la carretera, las personas que viven cerca de las carreteras y el daño al medio ambiente) lo convierte en la herramienta más amplia actualmente disponible para efectuar una evaluación objetiva de las propiedades medioambientales de los productos de construcción.

Como ejemplos de aspectos medioambientales tenemos: alteraciones o molestias debido a la generación de ruido, luz u olores desagradables, uso del suelo, agotamiento de las materias primas y de los recursos energéticos, emisiones a la atmósfera (efecto invernadero)

durante la producción, el transporte, la construcción y el uso de los firmes.

El programa calcula de manera automática el *impacto medioambiental* tomando como base tanto los datos LCA específicos del material⁽⁷⁾ como el método TWIN²⁰⁰².

También se calcula de manera automática los *costes* (por ejemplo, los de construcción, mantenimiento, rehabilitación y demolición) para cada material. El usuario puede introducir cualquier coste adicional y ajustar todos los precios unitarios. La inversión y el resto de los costes se calculan sobre la base del valor neto actual.

Los *otros factores* engloban una serie de efectos definidos sobre la construcción, el mantenimiento, las molestias y la seguridad para el usuario de la carretera. El usuario del programa informático puede puntuar estos efectos (posiblemente tras consultar con un especialista) según una escala del uno al siete. Esto permite al usuario del programa que indique cualquier mejora o cambio a peor con respecto a la alternativa de diseño de referencia.

Como ejemplos de otros factores tenemos: posibilidad de la construcción por etapas, riesgos que se pueden producir durante la construcción y el mantenimiento, duración de las actuaciones de mantenimiento, posibilidad de desviar el tráfico con facilidad (desvíos/flujo de tráfico), seguridad del tráfico y de los trabajadores, aspectos para el usuario de la carretera como la visibilidad, el confort (uniformidad, baches), accesibilidad a cables y tuberías bajo el pavimento, reducción del ruido, calidad del aire (polvo y olores).

MÉTODO DE EVALUACIÓN

Los resultados de los criterios de evaluación se normalizan antes de ponderarlos. La estandarización de las puntuaciones generadas como parte de la evaluación cualitativa de los elementos dentro del criterio *otros factores* se basa en la cifra de valoración de la situación de referencia. Esta evaluación cualitativa genera resultados expresados en términos de más y menos que se han de convertir en primer lugar en valores numéricos. El programa calcula y presenta a continuación las puntuaciones de cada criterio de valoración mostrando con claridad las interrelaciones y poniendo de relieve las áreas susceptibles de mejora.

El *método de análisis multicriterio (MCA)* facilita la comparación de las puntuaciones finales de diversos criterios de evaluación (costes, impacto medioambiental y otros factores). Se puede comparar un máximo de seis alter-

nativas de diseño por cada conjunto de datos básicos, uno de los cuales se designa como referencia. Dado el elevado grado de flexibilidad para introducir datos, es esencial que los responsables valoren de manera crítica la fiabilidad de los resultados finales. Es entonces posible establecer el peso relativo de los criterios de evaluación (costes, impacto medioambiental y otros factores). Dada la naturaleza subjetiva de los valores relativos, estos últimos se deben utilizar de manera juiciosa.

En 1995, el Gobierno holandés decidió que la valoración económica de los proyectos debería tener en cuenta una tasa de descuento del 4 por ciento. Por este motivo, el programa utiliza una tasa de descuento por defecto del 4 por ciento. La tasa de inflación se fija en el cero por ciento. Las directrices de otros países europeos establecen otras tasas de descuento, por ejemplo Alemania (3 por ciento), Reino Unido (6 por ciento), Dinamarca (7 por ciento) y Francia (8 por ciento). La Comunidad Europea mantiene un 5 por ciento como tasa adecuada. Un breve análisis del programa reveló que, dada la misma tasa de inflación, las variaciones en la tasa de descuento generan resultados distintos.

IMPORTANCIA DE LA PONDERACIÓN

La ponderación de los criterios genera una cierta resistencia. Su naturaleza subjetiva se utiliza para argumentar en contra del uso de cualquier forma de ponderación. Sin embargo, las alternativas siempre implican un cierto grado de ponderación. Por ejemplo, si no se utilizan en el modelo factores para ponderar, esto equivale a un factor de ponderación de uno. Para facilitar un análisis y una interpretación exhaustivos, se decidió que el programa le presente al usuario la opción de ver tanto los resultados ponderados como los no ponderados.

El modelo de apoyo a las decisiones basa su evaluación del criterio del *impacto medioambiental* en los costes medioambientales en los que se ha incurrido, que se determinan calculando los costes financieros necesarios para prevenir o remediar cierta emisión. Aunque no se trate de costes correspondientes a gastos realizados, pueden no obstante desempeñar un papel en el proceso de comparación (Figura 2).

Los usuarios del programa deben introducir su propio conjunto de ponderaciones para valorar el criterio de *otros factores*.

El uso de varios conjuntos de índices de ponderación cuando se comparan los distintos firmes no siempre da como resultado una preferencia clara por una alternativa de diseño determinada. La valoración final depende del

valor atribuido a cada criterio. No existe un método disponible para indicar qué es *mejor* o *peor*. Las comparaciones son normativas.

La sociedad determina la forma de tratar los criterios (costes, impacto medioambiental y otros factores). Se puede considerar que los índices de ponderación están bien fundamentados si generan consenso y si se les puede explicar con facilidad a las partes interesadas. Esto es muy distinto de *utilícese como estime oportuno*.

Las prioridades actuales son distintas de las que existían hace 20 años y de las que habrá dentro de 20 años. La comparación de los diversos criterios nunca se puede hacer de manera objetiva. Esto se aplica a cada comparación que se realice, tanto con la evaluación del modelo del *impacto medioambiental* y de los criterios de *otros factores* como con cualquier MCA llevada a cabo y en la cual se comparen las puntuaciones finales de los criterios para evaluar de manera definitiva los diversos tipos de firme de carretera.

Por tanto, las comparaciones no generan resultados absolutos. Esto quiere decir que el modelo de apoyo a las decisiones no está diseñado para tomar decisiones definitivas, sino que más bien sirve como herramienta para facilitar la toma de decisiones bien fundamentadas basadas en diferencias relativas.

Dada la posibilidad de que las distintas comparaciones puedan arrojar resultados diferentes, parecería bastante infructuoso que se llevase a cabo esta comparación de los criterios. Sin embargo, la fortaleza de un método de ponderación está básicamente arraigada en el hecho de que obligue al usuario a tomar decisiones y a llevar a cabo comparaciones de una forma tan explícita, bien meditada y transparente como sea posible.

La falta de la *mejor* alternativa significa que es sensato valorar diversos criterios con diferentes conjuntos de índices de ponderación. La comparación de los diversos resultados mejora la comprensión del usuario acerca de la dependencia del resultado final del conjunto de índices de ponderación utilizado. Las valoraciones que impliquen distintos conjuntos de índices de ponderación dan en

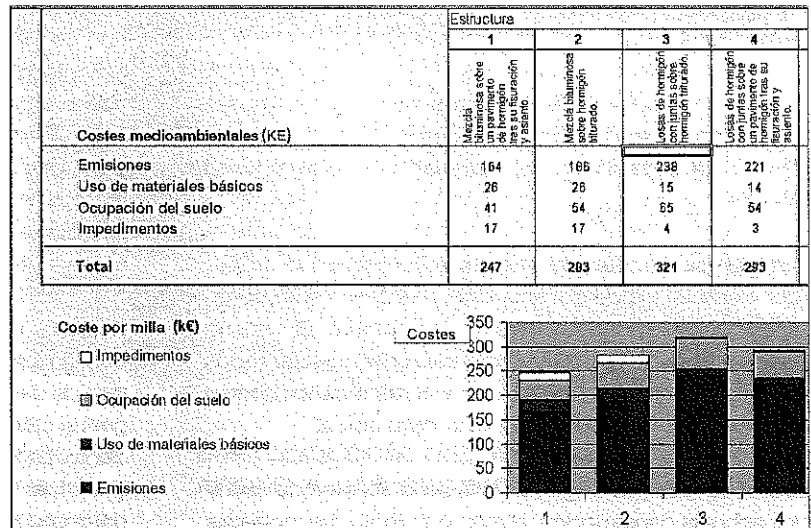


Figura 2. Resultados de los costes medioambientales de 4 alternativas

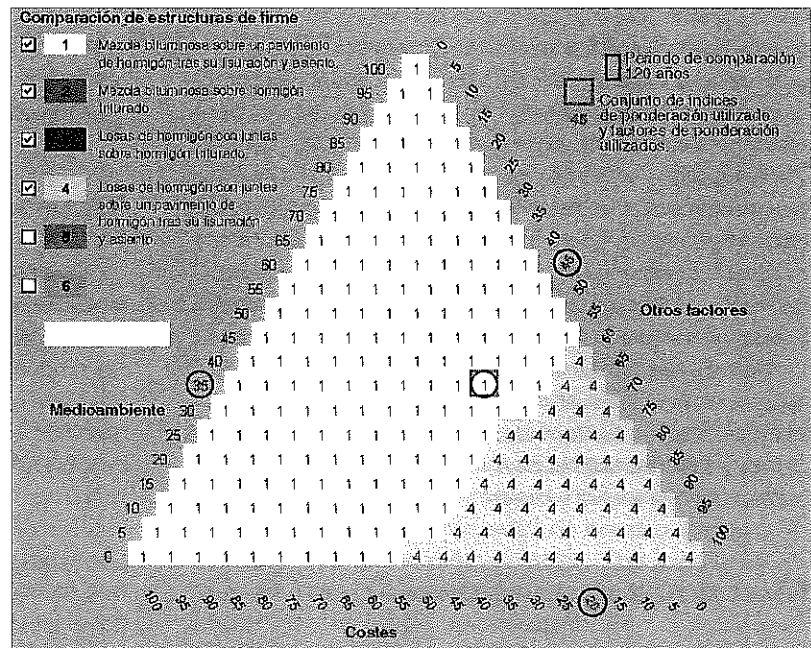


Figura 3. Resultados de la MCA presentados por la herramienta de triángulo de ponderación. La posición de la casilla señalada con un círculo representa el conjunto actual de índices de ponderación.

ocasiones como resultado diferencias inapreciables o muy limitadas. En algunos casos se puede concluir que los conjuntos de índices de ponderación utilizados tienen muy pocos efectos sobre el resultado final y, en consecuencia, que las diferentes maneras de ponderar los distintos elementos no son importantes.

Un triángulo de ponderación es una herramienta para comparar los distintos conjuntos de ponderación e indica el grado en que el conjunto influye sobre el resultado final (Figura 3). Los lados del triángulo representan los factores de ponderación para los *costes*, el *impacto*

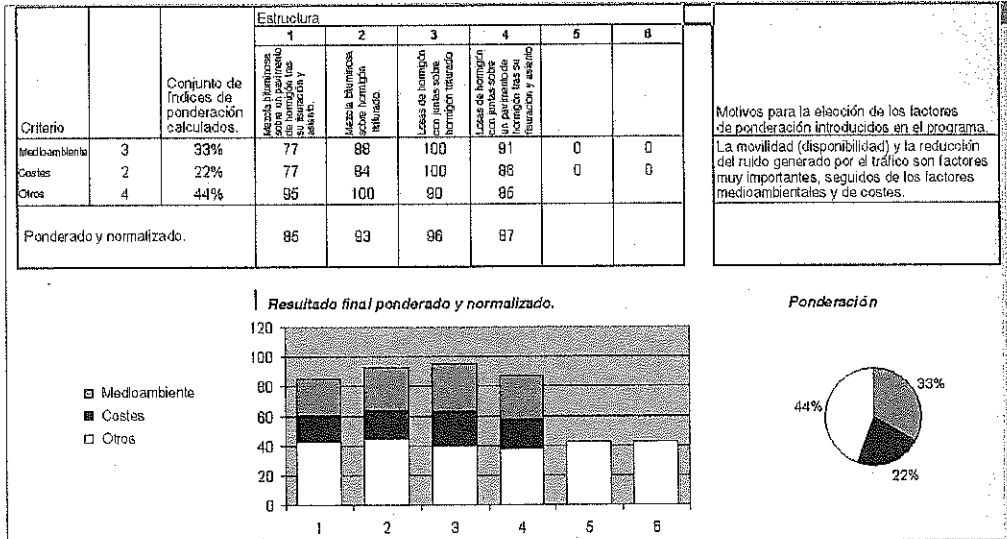


Figura 4. Resultados de la MCA para las 4 alternativas de firme tras la ponderación.

medioambiental y otros factores, que van del 0 al 100 por ciento. Esto permite la comparación de los distintos criterios. Los firmes que obtienen una buena puntuación con este conjunto de índices de ponderación se presentan en el triángulo.

El punto de intersección de las puntuaciones del factor de ponderación revela si el conjunto de índices de ponderación seleccionado cae de lleno en el campo de un solo firme o cerca de de la unión de varias alternativas. Mientras que el primero se puede interpretar como una clara preferencia por un tipo de firme (es decir, un conjunto de índices de ponderación ligeramente ajustado no arrojará un resultado diferente), el último significa que los distintos firmes generan puntuaciones comparables y que no existe una clara preferencia. Esto siempre se ha de estudiar conjuntamente con los resultados de la propia MCA.

ANÁLISIS MULTICRITERIO

La MCA es una herramienta para comparar las puntuaciones finales de los diversos criterios de evaluación.

Antes de comparar las puntuaciones, se han de convertir en primer lugar los datos en unidades comparables (normalización). El modelo de apoyo a las decisiones logra esto dividiendo la puntuación de cada criterio por la puntuación máxima generada para las alternativas de diseño introducidas.

La MCA del modelo de apoyo a las decisiones se basa en el método de suma ponderada y en la normalización que utilice la puntuación máxima generada (Figura 4).

Se ponderan las puntuaciones finales de los tres criterios de valoración, se normalizan y se añaden, presentándose entonces todos los datos en una tabla y en un historiograma. También se presenta el conjunto de índices de ponderación empleado. La estructura del firme con la puntuación más baja se considera la mejor alternativa o la más favorable utilizando este conjunto de índices de ponderación.

Se puede determinar si este resultado es significativo empleando la herramienta del triángulo de ponderación.

HERRAMIENTA FÁCIL DE USAR Y TRANSPARENTE

La estructura transparente y la presentación clara de los datos introducidos por el usuario y que genera el programa hacen que el *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* sea muy fácil de usar. Este nuevo programa hace que la comparación de varias alternativas de diseño técnicamente equivalente sea muy simple.

Para reducir la cantidad de datos necesarios, es posible seleccionar en el momento de empezar una estructura por defecto para distintos tipos de carreteras, como autopistas, carreteras nacionales, provinciales, comarcales y carriles bici. El usuario también puede introducir y guardar conjuntos personalizados de datos para su uso posterior. El programa incluye una gran cantidad de información que explica la forma en que trabaja el programa y los métodos empleados.

Las decisiones sobre el firmes de carretera adoptadas sin la participación de un modelo de apoyo que incluya una MCA a largo plazo no son transparentes ni están bien fundamentadas.

Los factores con mayor impacto sobre los resultados de la comparación son la vida útil de diseño de los firmes equivalentes y los programas de mantenimiento asociados, la vida útil asignada, los precios unitarios

para la construcción y el mantenimiento y la ponderación de los criterios de evaluación (costes, impacto medioambiental y otros factores).

Se debe advertir en este contexto que, por lo que concierne a los costes totales de la inversión en infraestructuras (nueva construcción), el firme supone tan sólo al 15 por ciento de los costes del proyecto en el caso de las autopistas. Las preconfiguraciones y la base de datos subyacente representan la situación holandesa. La herramienta no se ha probado ni adaptado a las diferencias regionales que puedan existir en otros países.

HISTORIAS DE CASOS

En el pasado se prestaba poca atención a la elección entre diversos tipos de firmes durante el proceso de construcción o rehabilitación de una carretera. La mayoría de los organismos responsables de las carreteras preferían las mezclas bituminosas o los adoquines en caso de que bajo el firme hubiera cables o tuberías y apenas se utilizaban los pavimentos de hormigón. Pese a esto, diversos gestores de carreteras han comparado los firmes de carretera durante años y han llegado a la conclusión de que son preferibles los de hormigón en determinadas circunstancias.

El *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* de CROW hace posible que esto se plasme de manera transparente. El usuario solamente puede introducir y cambiar sus propios datos en el criterio de *otros factores*. Esto es, de hecho, el único modo en que el usuario puede influir sobre la puntuación final, aparte de los precios unitarios y la vida útil asignados a los tipos de firme. En conjunto, la capacidad del usuario para manipular las puntuaciones es bastante limitada, lo cual beneficia la objetividad de los resultados.

La parte previa de este documento abordaba los principios subyacentes del modelo de apoyo a las decisiones y la parte siguiente presenta tres ejemplos de la aplicación del modelo: uno versa sobre una carretera provincial, otro una autopista y el tercero es una comparación entre varios tipos de pavimento de hormigón.

Alternativa de referencia: Pavimento bituminoso en todo el espesor (vida útil de diseño 20 años)	Alternativa: Pavimento de hormigón en masa con juntas con árido visto (vida útil de diseño 20 años)
40 mm DAD 0/16 mm (capa de rodadura)	
40 mm de hormigón bituminoso con árido de machaqueo 0/16 mm	265 mm de pavimento de hormigón en masa con juntas con árido visto 4/8 mm, clase C35/45
120 mm de hormigón bituminoso con árido de machaqueo 0/22 mm	
250 mm de mezcla de mampostería triturada y hormigón	250 mm de mezcla de mampostería triturada y hormigón

Tabla 1. Pavimento para carretera provincial, alternativas estudiadas.

1. Carretera provincial: principios básicos

Para empezar, los principios básicos y las hipótesis a adoptar deben estar claros. ¿Son los niveles de ruido requeridos coherentes con una mezcla bituminosa densa (DAC), que servirá de referencia en este ejemplo, o son los pavimentos más silenciosos los requeridos? ¿Cuál es la actual densidad del tráfico (en especial la intensidad de vehículos pesados) y cuál será al final de la vida útil de diseño? ¿Se diseñará la carretera según los principios conceptuales típicos holandeses de Seguridad Sostenible? ¿Cuál es la vida útil de diseño de la carretera? Estos principios e hipótesis básicos se tienen en cuenta cuando se calculan las alternativas de diseño.

Este ejemplo supone lo siguiente: emisión de ruido igual o menor al DAC, 15.000 vehículos diarios (de los cuales el 10 por ciento son HGV) y diseño de la carretera según los principios de Seguridad sostenible. A efectos de simplicidad, el siguiente ejemplo solamente incluirá dos diseños alternativos (mezcla bituminosa en todo el espesor y hormigón con árido visto EAC) concebidos para una determinada vida útil de diseño utilizando los programas BISAR y VENCON2.0 respectivamente. La Tabla 1 presenta los resultados.

1.1. Criterios especificados por el usuario en el modelo de apoyo a las decisiones

El modelo de apoyo a las decisiones compara los criterios de *costes*, el *impacto medioambiental* y los *otros factores*. Se pueden añadir los factores de evaluación especificados por el usuario para la sección de carretera en cuestión. En el presente ejemplo, es esencial que se indique que, por mor de la continuidad, ya hay pavimento de hormigón en ambas caras de esta sección de carretera. El diseño según los principios de Seguridad sostenible también son un punto clave al elegir el firme

Criterio	Peso relativo	Puntuación	
		Referencia alternativa 1: mezcla bituminosa DAC	Alternativa 4: hormigón con árido visto
Impacto medioambiental	2	98	100
Costes	3	100	81
Otros factores	3	100	89
Ponderado y estandarizado		99	89

Tabla 2. Valores y puntuaciones para la MCA de la carretera provincial, cuantos menos puntos, mejor el resultado.

porque los carriles relativamente estrechos y los desplazamientos limitados del tráfico exigen un pavimento que evite la formación de baches.

Los resultados de la comparación se ponderan a continuación como parte de una MCA para el cual el usuario determina el peso relativo de los criterios de evaluación. Lo habitual es que estos últimos se basen en los principios normativos de la autoridad competente. Por último, se puede utilizar la herramienta del triángulo de ponderación para determinar en qué grado generarán un resultado diferente los cambios en el conjunto de índices de ponderación correspondiente.

1.2. Resultado de la comparación

En el presente ejemplo, el peso relativo de los riesgos de construcción y de los niveles de seguridad y molestias durante la operación duplica al de los otros factores.

de construcción por etapas. El usuario solamente puede influir sobre el resultado del criterio *otros factores* que, en este ejemplo, favorece al hormigón.

El usuario apenas puede influir en la comparación de los criterios de *impacto medioambiental* y de *costes*. El modelo de apoyo a la decisión utiliza bases de datos que contienen información sobre los costes del impacto medioambiental y los costes de construcción y mantenimiento, siendo ajustable el primero por parte del usuario. En términos de impacto medioambiental, la puntuación para la alternativa del hormigón en masa con juntas y con árido visto se puede comparar con la puntuación del firme bituminoso. Por el contrario, la alternativa de hormigón es con mucho la más barata (calculada en base al ciclo de vida completo del firme).

Estos resultados se incluyen en una MCA en la cual

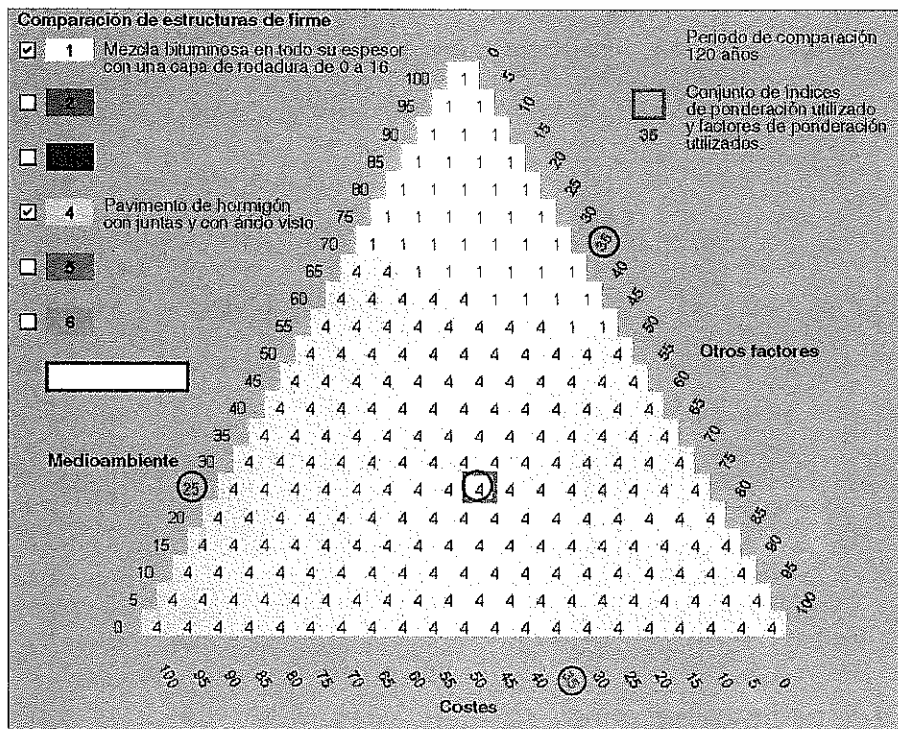


Figura 5. Herramienta del triángulo de ponderación para la comparación de dos alternativas de diseño para una carretera provincial

el *impacto medioambiental*, los *costes* y los criterios de *otros factores* se ponderan en una proporción de 2:3:3. Esto significa que los criterios de *costes* y *otros factores* pesan un poco más en la comparación que el criterio de *impacto medioambiental*.

Lo que es obvio en este ejemplo es que la alternativa del hormigón en masa con juntas y árido visto obtiene la mejor puntuación. Esto se basa en el resultado de la propia MCA, véase la Tabla 2 y los del triángulo de ponderación en la Figura 5.

El triángulo de ponderación del modelo de apoyo a las decisiones indica que un cambio en el conjunto de índices de ponderación utilizado no arrojará una conclusión diferente (Figura 5).

Alternativa de referencia (bituminoso) STAB (vida útil de diseño de 20 años)	Alternativa de referencia (bituminoso) EME (vida útil de diseño de 20 años)	Alternativa de referencia (hormigón) CRCP (vida útil de diseño de 20 años)
70 mm capa drenante doble PAFC	70 mm capa drenante doble PAFC	70 mm capa drenante doble PAFC
300 mm STAB 0/22 mm	240 mm EME	250 mm CRCP C35/45
		60 mm mezcla bituminosa
250 mm mezcla de hormigón y mampostería triturada	250 mm mezcla de hormigón y mampostería triturada	250 mm mezcla de hormigón y mampostería triturada
1 m base granular	1 m base granular	1 m base granular

Tabla 3. Alternativas estudiadas de firmes para autopistas.

La casilla señalada con un círculo que representa el conjunto de índices de ponderación escogido está claramente situada en la zona señalada con fondo oscuro del triángulo, el hormigón con árido visto. Este firme continuaría siendo la opción preferida haciendo profundos cambios en los criterios de evaluación individual. En consecuencia, la preferencia en este ejemplo se considera significativa. Se debería advertir que la elección de una alternativa se debe tomar teniendo en cuenta los resultados de la MCA.

2. Autopista de tráfico intenso: principios básicos

Este ejemplo de comparaciones se realiza para una autopista nueva de dos carriles por sentido. Se calcula que en 2020 circularán todos los días laborables por este tramo de carretera 112.000 vehículos, de los cuales el 44 por ciento serán vehículos pesados.

Dada la gran densidad de tráfico, se consideró que el riesgo de que se formen baches era una desventaja real de los firmes flexibles ya que esto exigiría un mantenimiento adicional. Aunque la formación de baches no suponga un problema para los pavimentos de hormigón armado continuo (CRCP), los costes iniciales de este firme son más elevados. La elección entre los distintos tipos de firmes (uno bituminoso y otro de hormigón armado continuo) queda respaldada si se utiliza el modelo de apoyo a las decisiones CROW.

2.1. Alternativas estudiadas

La Tabla 3 presenta una visión de conjunto sobre los tipos de firme estudiados. Cada una de estos firmes tienen una capa de rodadura que consta de dos estratos de capa de mezcla drenante (PAFC) para reducir el ruido. El "Enrobé à module élevé" (Mezcla de alto módulo, EME) es una mezcla bituminosa de módulo elevado desarrollado en Francia con una mayor rigidez y una resistencia a la formación de baches. La alternativa de referencia es una construcción estándar

utilizando una mezcla bituminosa con árido de machaqueo (STAB).

2.2. Comparar es elegir

Por desgracia, el modelo de apoyo a las decisiones no genera un resultado final indiscutible con sólo pulsar un botón. Las decisiones implícitas tomadas como parte del proceso de comparación pueden ejercer una gran influencia sobre el resultado final. La ventaja del modelo de apoyo a las decisiones consiste en que la elección se lleva a cabo de una forma estructural, transparente y trazable, lo que proporciona una comprensión de la validez de las conclusiones.

Las decisiones implícitas que se han de realizar afectan a:

- Los detalles en el cálculo del espesor del firme. El diseño y los espesores de los firmes bituminosos se suelen determinar utilizando las aplicaciones ASCON/CARE (programas de estratos elásticos lineales múltiples), mientras que la misma información para los pavimentos de hormigón se calcula con el VENCON2.0. Puesto que los costes de construcción dependen del diseño del pavimento y de los espesores de la capa introducidos por el usuario, los ajustes de los cálculos de diseño afectarán a los resultados de la comparación. Los gradientes de temperatura para el diseño del CRCP se han seleccionado de modo que incluyan el efecto beneficioso de la capa de rodadura de mezcla porosa, derivado de las mediciones sobre firmes similares.
- La probabilidad de que un firme bituminoso para carreteras se tenga que reforzar con una capa superior al final de la vida útil de diseño se debe basar en la experiencia práctica con firmes comparables. La amplia experiencia con firmes bituminosos de referencia indica que el 50 por ciento de los firmes necesitan que los refuercen y/o perfilen al final de su vida útil de diseño y que el 50 por ciento durarán al menos otros 10 años. El envejecimiento debido a la climatología es desdeñable

Criterio	Peso relativo	Puntuación		
		Referencia: STAB	Alternativa (bituminosa): EME	Alternativa (hormigón): CRCP
Impacto medioambiental	1	78	76	100
Costes	2	100	87	89
Otros factores	3	100	67	58
Ponderado y estandarizado		96	78	81

Tabla 4. Valores y puntuaciones de MCA para autopistas. Cuanto menor sea la puntuación, mejor será el resultado

por la presencia de la capa de mezcla drenante, que necesita una sustitución cada 10 años.

- El riesgo reducido de que se formen baches con la aplicación del EME en lugar de la mezcla STAB estándar también se debe basar en la experiencia práctica con firmes de carretera comparables. Existe una gran cantidad de experiencias en Francia con firmes bituminosos de módulo elevado que demuestra que la fisuración no es un problema. La degradación de la carretera se limita a la capa de rodadura de mezcla porosa.

2.3. Resultado de la comparación

La Tabla 4 presenta las puntuaciones finales de la comparación. El impacto medioambiental se analizó utilizando en enfoque de TWIN²⁰⁰² del modelo de apoyo a las decisiones, que expresa las emisiones, el agotamiento de las materias primas, el uso del suelo y las molestias como costes medioambientales. La categoría de *otros factores* incluye los riesgos de construcción (17 por ciento), las molestias debidas a la construcción y al mantenimiento (33 por ciento), la seguridad del usuario de la carretera (17 por ciento) y los retrasos del tráfico durante las tareas de mantenimiento (33 por ciento).

La conclusión es que las alternativas son mejores que la opción de referencia (verbigracia, STAB) y los costes son muy inferiores. La puntuación del *impacto medioambiental* del EME es la mejor por el espesor reducido de la capa bituminosa, mientras que la puntuación de los *otros factores* del CRCP (relacionada con el mantenimiento) es la mejor. Cuando se estudian las puntuaciones acumuladas de todos los criterios, EME y CRCP resultan ser al final muy similares.

Un análisis de sensibilidad revela (no se presenta aquí) que las puntuaciones finales se ven altamente influidas por el diseño del espesor del firme, la evaluación de otros factores (riesgo estimado de formación de baches) y las puntuaciones de los valores relativos para la comparación de otros factores y la MCA. Dado el crecimiento esperado en la proporción de vehículos pesados en los Países Bajos, las comparaciones similares en donde la

formación de baches desempeñe un mayor papel se harán más corrientes. Para que la comparación sea válida, las elecciones que se han de efectuar en el proceso se deben basar en los datos experimentales en lugar de en razonamientos subjetivos.

3. Elección entre hormigón en masa con juntas (JPCP), hormigón con fibras de acero (SFRCP) y del hormigón armado continuo (CRCP): principios básicos

A partir de otro estudio CROW⁽¹⁾ se supuso que los firmes de SFRC se deberían considerar una alternativa al hormigón en masa con juntas en lugar de los pavimentos de hormigón armado continuo. El motivo para esto es que la cantidad de refuerzo necesario en los pavimentos de hormigón armado continuo (aprox. 61 kg/m³) apenas se puede sustituir por una cantidad equivalente de fibras de acero. Si se compara con los pavimentos de hormigón en masa con pasadores y armadura de atado (aprox. 8 kg/m³), la mayor resistencia a la tracción y la mayor resistencia tras la figuración del hormigón con fibras (fibras de acero, aprox. 40 kg/m³) permite una reducción del número de juntas transversales de retracción. Como resultado, la cantidad de juntas aserradas y el acero de pasadores y armadura de atado se puede reducir de manera considerable.

Naturalmente, la cuestión es si la suposición de que el SFRCP y el JPCP son iguales desde un punto de vista económico y medioambiental se puede apoyar en los cálculos del modelo de apoyo a las decisiones. Por tanto, se deben conocer los precios unitarios; en los Países Bajos se consideran realistas los siguientes precios por metro cuadrado para un pavimento de hormigón con un espesor de 250 mm: 115 por ciento para pavimentos de CRCP, 130 por ciento para los de SFRC en relación con la inversión en JPCP, que es del 100 por ciento.

Al utilizar el programa holandés de diseño VENCON2.0⁽²⁾, se pueden calcular estructuras equivalentes para CRCP y JPCP. El diseño del SFRCP se basa principalmente en

Criterio	Peso relativo	Puntuación		
		Referencia: JPCP	Referencia: CRCP	Referencia: SFRCP
Impacto medioambiental	1	76	100	81
Costes	1	94	100	94
Otros factores	1	100	100	100
Ponderado y estandarizado		90	100	92

Tabla 5. Valores y puntuaciones de JPCP, SFRCP y CRCP. Cuanto menor sea la puntuación, mejor será el resultado

las experiencias de proyectos recientes. Esto da como resultado un espesor de 238 mm (sobre un estrato bituminoso intermedio de 50 mm) para el CRCP, de 266 mm para el JPCP y de 225 mm para el SFRCP. Todos estos datos que se introducen en el modelo de apoyo a las decisiones conducen a los resultados que se muestran en la Tabla 5.

La Tabla 5 presenta una visión de conjunto sobre los tipos de pavimentos de hormigón estudiados. A partir de estos resultados se puede concluir que siendo todos los criterios de ponderación de 1 y con los espesores presentados, no existen diferencias significativas entre el JPCP y el SFRCP y que se pueden considerar iguales desde un punto de vista económico y medioambiental, aunque no sea éste necesariamente el caso para la igualdad estructural.

CONCLUSIONES

Las decisiones sobre firmes de carretera adoptadas sin la participación del modelo de apoyo a las decisiones que incluye una MCA a largo plazo no son transparentes ni están bien fundamentadas.

En el pasado se prestaba poca atención a la elección entre diversos tipos de firmes durante el proceso de construcción o rehabilitación de una carretera. Los gestores de carreteras han comparado los firmes durante años y han llegado a la conclusión de que son preferibles los de hormigón en determinadas circunstancias. El *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* de CROW hace posible que esto se plasme de manera transparente.

El *Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera* está diseñado para permitirles a los ingenieros de carreteras, gestores, consultores y a quienes tomen las decisiones perfilar con claridad y tener en cuenta factores como el impacto medioambiental, que se determina aplicando valoraciones del ciclo de vida (LCA), efectos de los costes basados en el coste del ciclo de vida (LCC) y las consecuencias de cualquier otro factor cuando se

comparen las diversas estructuras de firme (alternativas de diseño).

El uso del modelo permite a los ingenieros de firmes y a quienes tomen las decisiones adoptar la decisión correcta sobre el tipo de pavimento de una forma transparente. Esta herramienta convencerá a las autoridades de que no sólo es importante la inversión en la construcción, sino también en especial los *costes totales de propiedad* durante la vida útil del firme.

Los factores que dejan sentir unos mayores efectos en los resultados de la comparación son la vida útil de diseño de firmes equivalentes y los regímenes de mantenimiento asociados, los periodos de vida útil asignados, los precios unitarios de construcción y mantenimiento y los índices de ponderación de los criterios de evaluación (costes, impacto medioambiental y otros factores).


REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

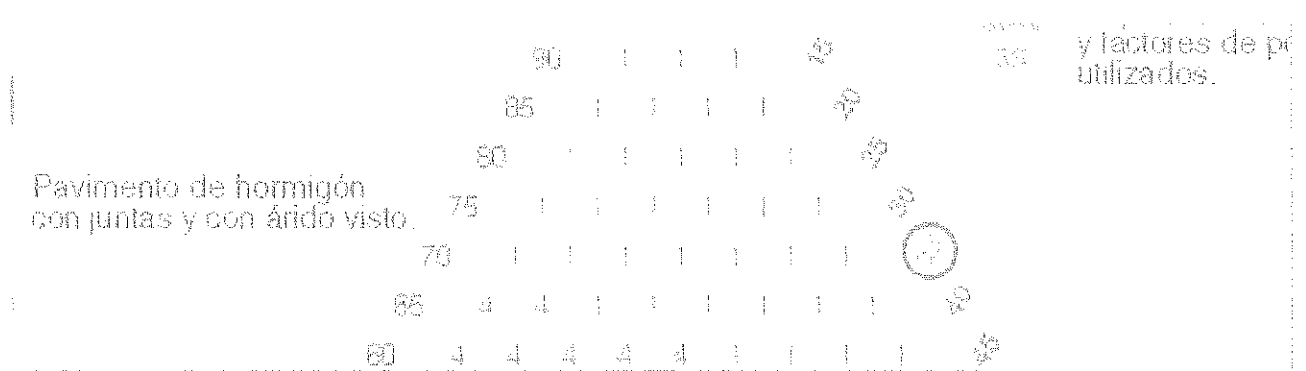
1. Braam C.R., Van Leest, A.J., Van Hartkamp, S.B., Jurriaans, G., Van der Steen, C.A. y Stet, M.J.A (2008); "Fibre concrete mixes in road pavements; in between plain and reinforced concrete?". IX Conferencia Internacional sobre Pavimentos de Hormigón, San Francisco, EE.UU.
2. CROW (2005); VENCON2.0 "Software para diseño de carreteras de hormigón" (en holandés). DC-ROM D925. CROW, Ede, Países Bajos.
3. CROW (2008); "Afwegingsmodel Wegen (AMW) [Modelo de apoyo a las decisiones sobre firmes de carretera] versión 1.1", (CD-ROM D926), Plataforma tecnológica CROW, Ede, Países Bajos.
4. NIBE (2002); "Basiswerk Duuzaam & Gezond Bouwen: Milieuclassificatie Bouw, Monitiseren (verborgen milieukosten) [Construcción sostenible y saludable de referencia: Sistema de clasificación medioambiental de edificación y construcción, monetización (cos-

tes medioambientales ocultos)]", NIBE Research bv, Bussum, Países Bajos.

- 5. NIBE (2002); "Basiswerk Duzaam & Gezond Bouwen: Milieuclassificatie Bouw, TWIN-model 2002 [Construcción sostenible y saludable de referencia: Sistema de clasificación medioambiental de edificación y construcción, método TWIN²⁰⁰²]", NIBE Research bv, Bussum, Países Bajos.
- 6. RHED; "DWW-wijer 85: Werking van de Levenscyclusanalyse [Guía RHED 85: Metodología de

análisis del ciclo de vida]", Dirección general de obras públicas y gestión del agua, división de carreteras y de ingeniería hidráulica, Delft, Países Bajos.

- 7. RHED (2003); "Keuzemodel Kust- en Oeverwerken (KKO) [Modelo de toma de decisiones para las estructuras de defensa costeras y terraplenes fluviales]", Dirección general de obras públicas y gestión del agua, división de carreteras y de ingeniería hidráulica, Delft, Países Bajos. 



y factores de p
utilizados.

CARRETERAS 2009

Asociación Española de la Carretera
O'Donnell, 18 - 5ª H • 28009 Madrid
Telf. 91 432 43 18 • Fax: 91 432 43 19
e-mail: comdis@cycdiseno.com

BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN

Deseo suscribirme por un año a la revista **CARRETERAS**.
El importe de esta suscripción (IVA incluido):

España65,00 €

Europa107,00 €

América165,00 US \$ •115,00 €

Números sueltos24,00 € / ejemplar

lo hago efectivo mediante Cheque Metálico

Transferencia bancaria a nombre de **COMUNICACIÓN Y DISEÑO, S.L.**

Nombre: _____

Empresa: _____ C.I.F.: _____

Actividad: _____ Tel: _____

Dirección: _____

E-mail: _____

Código postal y Ciudad: _____

Provincia y País: _____

