

# CARRETERAS



4ª EPOCA-NÚM. 191-SEPTIEMBRE/OCTUBRE 2013-REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

ESPECIAL  
XVII CONGRESO MUNDIAL DE IRF

Riad (Arabia Saudí)  
10-14 noviembre 2013

Transport Policy & Economics

Integrated Mobility & ITS

Ideas españolas para mover el mundo

Pavements & Materials

Sustainable Transport

Cortesia de / by courtesy of



www.proas.es



Pabellón de España

## Presentaciones institucionales

- Ministra de Fomento
- Ministro del Interior

## Presentación del número especial:

17º Congreso Mundial de la Federación Internacional de Carreteras (IRF)

Revista *Carreteras* (nº 191 - septiembre/octubre de 2013)

## Contenido técnico

- Puentes esculturales: estructuras épicas  
José Luis MANZANARES JAPÓN
- Gestión de las autopistas para mejorar la eficiencia energética  
Andrés MONZÓN / Natalia SOBRINO / Sara HERNÁNDEZ
- Nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales  
Alfredo GARCÍA GARCÍA / Francisco Javier CAMACHO TORREGROSA / Ana María PÉREZ ZURIAGA / Manuel LÓPEZ PORTA
- La conservación de las carreteras en tiempos de recesión económica  
Miguel A. DEL VAL
- Desarrollo de los puentes en España  
Javier MANTEROLA ARMISÉN
- La evolución de los nudos viarios en España. Una guía para el diseño de nudos viarios  
Sandro ROCCI
- La calidad del servicio del transporte público para promocionar una movilidad más sostenible.  
Caso de estudio  
Juan De Oña López / Rocío de Oña López

## Información de interes

- Recomendaciones para la presentación de artículos a la Revista *Carreteras*
- Guía del anunciante



# Presentaciones institucionales

---

**Ana Pastor Julián**

Ministra de Fomento

**Jorge Fernández Díaz**

Ministro del Interior



## **Ana Pastor Julián**

**Ministra de Fomento**

La celebración del 17º Congreso Internacional de la Federación Internacional de Carreteras (IRF) es una magnífica ocasión para reunir a la comunidad internacional que trabaja día a día por un mayor y mejor desarrollo de la red viaria, y poner en común los avances que en materia de planificación, proyecto, construcción, conservación y explotación de las carreteras se han producido a lo largo de estos últimos años, así como para definir conjuntamente cuáles son los retos de futuro.

La carretera es, esencialmente, la infraestructura que posibilita un tráfico mayor de personas y de bienes, contribuyendo al crecimiento económico y a la cohesión social. Es por ello una infraestructura de transporte que históricamente ha experimentado un importante desarrollo en numerosos países y que ha sabido cumplir a la perfección su función, pero en la que debemos seguir invirtiendo el esfuerzo necesario para mejorarla cada vez más, haciéndola más segura, dotándola de un mayor nivel de servicios para los usuarios y favoreciendo un mayor nivel de conectividad con otros medios de transporte.

España es un país con una gran experiencia en construcción y conservación de infraestructuras, líder en técnica, calidad, eficiencia y economía de tiempos. Prueba de ello es el desarrollo en los últimos 30 años de una de las más extensas redes de autopistas de Europa, con 14.700 Km. de longitud, superando una orografía difícil y con el más estricto respeto al medio ambiente.

El 17º Congreso Mundial ofrece a España una oportunidad inmejorable para mostrar a la comunidad internacional su gran capacitación técnica y los logros conseguidos con ella. Y es, asimismo, una excelente oportunidad para brindar la colaboración de todas las empresas y técnicos españoles, a los que se debe en gran medida el nivel de infraestructuras alcanzado en nuestro país, para contribuir al desarrollo y mejora de las carreteras de todo el mundo.



## Jorge Fernández Díaz

Ministro del Interior

En primer lugar, mis más sincero agradecimiento a la Asociación Española de la Carretera por invitarme a esta página del número especial que su revista, *Carreteras*, ha elaborado con motivo de la celebración del 17º Congreso Mundial de la Federación Internacional de Carreteras, en Riad (Arabia Saudí), donde la industria española expondrá a la comunidad viaria internacional el alto nivel científico y tecnológico que ha alcanzado este sector. Por ello, es pertinente recordar que se trata de un área de alta importancia para la economía del país y que ha cosechado notables avances en los últimos años. Paralelamente, la Administración no ha querido quedarse atrás y así, desde el Ministerio del Interior, hemos dado pasos de gigante para garantizar la seguridad de los conductores en nuestras carreteras. Es un asunto que en este Departamento nos preocupa y ocupa porque una sola muerte es una tragedia.

Los datos, que son más elocuentes que las palabras, nos indican que vamos por el buen camino. El descenso del número de fallecidos en los últimos años ha sido tan significativo que la cifra de muertos registrada en 2012, 1.304 víctimas mortales, es prácticamente similar a la de 1960, cuando perdieron la vida en la carretera 1.300 personas. Y este dato adquiere aún más relevancia si tenemos en cuenta que hace 52 años circulaban por las carreteras españolas tan sólo un millón de vehículos, mientras que en 2012 lo hicieron casi 32 millones. Además, llevamos ya nueve años consecutivos de descenso de la accidentalidad en carretera y especialmente revelador es el hecho de que durante el año pasado se produjeron 2.937 muertos menos que en el año 2000, en el que se registraron 4.241 fallecidos. En consecuencia, en el promedio de víctimas mortales hemos pasado de 11,6 muertos diarios en 2000 a tener 3,6 en 2012, es decir, 8 muertos menos cada día.

Aunque los datos marcan una clara tendencia positiva, son, lejos del conformismo, un acicate para seguir trabajando con ahínco y firmeza en la búsqueda de nuevas fórmulas que potencien la seguridad de los conductores en las carreteras. Con este objetivo, el pasado mes de julio llevé al Consejo de Ministros el Anteproyecto para reformar la Ley de Tráfico y Seguridad Vial, que fue aprobado. Esta modificación es de gran trascendencia porque busca no sólo adaptar la normativa a las necesidades de los conductores, sino también a los cambios que se producen en los vehículos y las vías, factores determinantes en la producción de accidentes.

Varios son los sectores con responsabilidad en la seguridad de las carreteras y, entre todos, tenemos que conseguir que el binomio carretera-siniestralidad sólo pueda ser visto por el retrovisor. Las carreteras han de ser vías de comunicación, infraestructuras que generen riqueza, progreso y bienestar a los ciudadanos, no un lugar donde se pueda perder la vida. Por ello, el compromiso del Ministerio del Interior es seguir trabajando con tesón y perseverancia para que la actual línea descendente de la accidentalidad continúe en el futuro. [📄](#)

## Número especial 17º Congreso Mundial de la Federación Internacional de Carreteras (IRF)

Jacobo DÍAZ PINEDA

*Director General de la Asociación Española de la Carretera  
Coordinador*

Se cumplen veinte años de la organización en España (Madrid) de la décimo segunda edición del Congreso Mundial de la Federación Internacional de Carreteras (IRF en sus siglas en inglés).

Nada hacía presagiar entonces que aquel mes de mayo de 1993 se convertiría en el pistoletazo de salida de una amplia y sostenida línea de acción de la Asociación Española de la Carretera (AEC) en el ámbito internacional. Una línea de acción que empezaría a dar sus frutos a finales de aquella década, materializada en la creación de la Federación Europea de Carreteras (ERF, en inglés), proceso en el que la AEC jugó un rol fundamental.

La apuesta por el mercado europeo, el espacio natural en el que el sector viario español debía estar representado, se trasladaría pocos años después a la Región de Latinoamérica y Caribe, en la que la Asociación Española de la Carretera apostaría por liderar la representación institucional de la industria de carreteras, constituyendo el Instituto Vial Ibero-Americano (IVIA) allá por el año 2005.

El compromiso de internacionalización de las actividades propias de la Asociación ha ido adquiriendo forma y peso específico en el transcurso de estos veinte años, en los que las infraestructuras viarias españolas han recibido el mayor impulso de su historia, contribuyendo a la extraordinaria transformación del país, de su territorio, de su orografía y, sobre todo, de los conceptos de progreso y bienestar.

Embarcada en aportar visión de conjunto y equilibrio de intereses en dicho proceso interno de modernización de las vías, la AEC asumió en paralelo el reto de trasladar a Europa, a Iberoamérica y al mundo entero la tecnología que, con las mayores cotas de efectividad, se desarrollaba y aplicaba en España.

Ningún país puede avanzar de manera tan rápida y sostenida, como lo ha hecho España, si no es apoyado en una gran red de carreteras. Y para promocionar ese

desarrollo y el de las empresas y administraciones que lo hicieron realidad, siempre se ha contado con la revista técnica de referencia del sector. La que tienen entre sus manos. CARRETERAS.

Ejemplo de esa transmisión de los avances técnicos y tecnológicos que han dado lugar a la gran transformación de la red viaria de nuestro país en las dos últimas décadas bien puede ser este especial de la Revista *Carreteras*. Una edición pensada por y para el Congreso Mundial de Riad y para la que se ha contado con la inestimable colaboración de muchos de los más ilustres catedráticos de Universidad relacionados con el mundo viario.

En estas páginas podrán encontrar, concentrados de manera clara y didáctica, muchos de los aspectos más importantes que han permitido ese vertiginoso cambio en la malla de caminos del país. Desde los aspectos técnicos y normativos más significativos, la estructura administrativa tipo que los incentiva, la sensibilidad en la toma de decisiones para garantizar una óptima integración ambiental, o los aspectos relacionados con la mejora continuada de la seguridad de las vías.

Sin olvidar las estructuras económico-financieras que han hecho posible la consecución de este reto, las tecnologías adecuadas para optimizar la gestión del tráfico, así como muchos de los más importantes puentes y viaductos desarrollados en el país en estas décadas.

Todo ello convierte esta edición de la Revista *Carreteras* en un verdadero vademécum de soluciones técnicas y constructivas que puede guiar sin duda el desarrollo de cualquier red de carreteras de un país.

Hoy, en Riad, o en muchos otros lugares del mundo donde España tiene una gran experiencia que ofrecer, presentamos esta revista como muestra de lo acertado de la gestión y desarrollo de la red actual de carreteras en España. Espero que la disfruten. 

LAS CARRETERAS HECHAS  
CON BETUNES **ELASTER** AÚN ESTARÁN AHÍ  
CUANDO YA NO SEAN NECESARIAS.



**PROAS PRESENTA ELASTER, SU NUEVA GAMA DE  
BETUNES MODIFICADOS CON POLÍMERO.**

Tecnología punta aplicada al Betún para que tus carreteras  
sean más seguras, ecológicas y longevas.

[www.proas.es](http://www.proas.es)

**PROAS**

*Innovando para ti*



# Puentes esculturales: estructuras épicas

José Luis MANZANARES JAPÓN

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

## RESUMEN

**Los puentes tienen un impacto inevitable en el paisaje. Son una oportunidad para crear esculturas que transmitan sensaciones, ideas y sugerencias al espectador. El ingeniero que toma conciencia de esta trascendencia da una nueva dimensión a la estructura y al papel de la profesión en la sociedad.**

*Palabras clave: Puente, Paisaje, Estructura, Diseño*

## ¿PUENTES ESCULTURAS?

Desde hace años hay abierto un debate apasionado entre los especialistas en el paisaje de la carretera que suele cristalizar en tres preguntas. ¿Es favorable el impacto de sus puentes o son objetos demasiado pesados que desfiguran y empobrecen el entorno natural? ¿Es preferible buscar formas sencillas, exclusivamente funcionales, que sean aceptadas con resignación y pasen casi desapercibidas o, por el contrario, hay que enfrentarse a la realidad de su impacto con la responsabilidad de enriquecer la perspectiva donde se ubican? ¿Los puentes son solo estructuras y como tales deben sus formas de manera exclusiva a esquemas resistentes o gozan también de la categoría de las esculturas?

La experiencia ha puesto de manifiesto que todos los diseñadores de puentes han asumido, en mayor o menor medida, en las últimas décadas una realidad que antes les era ajena: los puentes constituyen un elemento clave en el paisaje antrópico. No son solo estructuras, también pueden tener en la mayor parte de los casos la condición de esculturas.

Son objetos de gran tamaño; impactan visualmente de tal manera en el territorio que acaban por atraer inevitablemente todas las miradas; se convierten en protagonistas del escenario; constituyen paisaje por sí mismos; no pasan jamás desapercibidos y despiertan siempre en el observador un torrente de sentimientos: admiración, respeto, aversión, rechazo... Un puente, lo pretenda o no

su autor, se convierte en hito de referencia, patrimonio público, herencia de generaciones y monumento urbano si es una ciudad la que lo acoge.

Toda figura, esculpida, modelada o erigida que se sitúa en un espacio humano como hito público tiene la condición de escultura. Incluso un edificio, cuya forma exterior atraiga la atención por sí misma para destacarse del resto de la urbe, se considera un edificio-escultura. Otro tema muy diferente es en qué tipo escultural se incardina y qué categoría merece.

La preocupación por la estética de los puentes ha existido siempre. Al final del siglo XIX ya se planteaba la polémica sobre la capacidad de los ingenieros para resolver satisfactoriamente la cuestión de la belleza en sus obras y la necesidad de contar con la colaboración de arquitectos para conseguirla. Eiffel abordó el tema tajantemente cuando afirmó: "Porque somos ingenieros, se cree que no nos preocupa la belleza de nuestras construcciones y que, mientras las hacemos sólidas y durables, no nos esforzamos por hacerlas elegantes. ¿Es que las verdaderas funciones de la fuerza no son siempre conformes con las condiciones secretas de la armonía?"

En nuestra opinión, el gran ingeniero francés se equivocaba porque la estética no siempre es hija de la estática. Pero gran parte de la formación de los estructuralistas ha sido hija de aquella frase y su preocupación estética se ha reducido a un espacio pequeño, pura y exclusivamente estructural, que considera contaminante el empleo

de cualquier aditamento no resistente. Por eso, la tesis tradicional del siglo XX ha sido la de concebir al puente solo como pura estructura. Su imagen es hija única de los elementos resistentes que lo constituyen, de la función a la que se debe, de las condiciones físicas del contorno que lo alberga y del método constructivo que lo ha posibilitado.

No cabe duda de que ese concepto es limitado y empobrecedor. Con la globalización, los conocimientos estructurales de cálculo y de sistemas constructivos se han divulgado y universalizado. Hoy están al alcance de cualquiera. Así, es fácil encontrar puentes similares, si no idénticos, en lugares de cultura, paisaje o población muy diferentes. Esta estandarización de la forma los convierte en objeto de catálogo sin vocación de singularidad.

Con ese punto de vista, para la mayor parte de los grandes ingenieros que hoy en día los diseñan, el puente es apátrida, ajeno a razas, modas, cultura y ambientes. Cuando ellos conciben los puentes, lo hacen primero solo como estructuras que deben responder a una función, de construcción posible y costo mínimo. También se preocupan de que sean hermosos, pero rara vez se plantean pensar en ellos como una forma de expresión.

Porque es aquí donde radica la clave de la dicotomía estructura-escultura. El escultor que erige una obra de arte no se propone como objetivo que sea bella. La estética no es la razón última de la escultura. Su autor quiere expresar a través de su obra sus sentimientos, desea transmitir sensaciones y pretende utilizarla como medio de diálogo con sus espectadores. El proceso de creación escultural es similar al de componer una sinfonía, escribir una novela o pintar un cuadro. Equivale a materializar el alma del creador que deja para la posteridad un trozo cristalizado de su espíritu puesto al servicio de los demás.

Los que, cuando diseñan, piensan solo en un plano estructural no tienen la intención de crear esculturas, objetos artísticos que pretenden expresar sentimientos y transmitirlos al espectador. El problema es que, sin embargo, aunque no se lo hayan planteado, realmente las están erigiendo. Eso sí, sin alma, porque no han nacido para expresar ningún sentimiento ni idea. Son hijas concebidas sin la vocación de trascendencia de un padre que pretenda perpetuarse en ellas.



Foto 1. Vista panorámica del puente El Guardián del Castillo en Alcalá de Guadaíra.

Esta forma de concebir el puente, sin la conciencia de su papel escultural, lleva consigo otra circunstancia, negativa desde el punto de vista del ingeniero. Y es la falta de autoría que conlleva. Al igual que no se puede desligar una escultura de la mente que la ha concebido, los objetos visuales que tienen la condición de elementos de un catálogo son, en cambio, huérfanos, no tienen padre desde el punto de vista público. Cuando un ingeniero diseña un puente sin intención escultural, renuncia simultáneamente a tener presencia pública como autor.

El empeño por despersonalizar la estructura, desarraigada de un mensaje, un autor y un pueblo, y dejarla encerrada en su estricto papel resistente sin aprovechar las posibilidades que ofrece su dimensión de gran objeto visual, es paralelo con su anonimato. Si no está vinculada a un autor que intenta comunicar sus sentimientos a través de ella, nadie conocerá a su creador. Será una obra sin firma y como tal, de escaso valor. En la sociedad actual, solo se reconoce la valía de las expresiones artísticas o intelectuales que vengán suscritas por una rúbrica.

Hay que ser consciente de que esa puede ser una de las razones de que los técnicos no gocen de prestigio social. Nadie ajeno al sector sabría citar en una encuesta nombres de ingenieros ilustres, y por eso sus obras luchan por competir en desigualdad de condiciones con las arquitectónicas que disfrutaron de esa cualidad fundamental que se llama "el estilo propio".

La arquitectura conoce perfectamente el papel de la obra como comunicadora entre el autor y el lector, lo

define como el aspecto semántico de las construcciones. Una obra no debe ser solo funcional, resistente y económica: también debe transmitir un mensaje, comunicar sentimientos, despertar sensaciones y, para ello, debe utilizar un lenguaje. Y esa manera de concebir su trabajo, establece un diálogo de la sociedad con el autor que automáticamente da personalidad pública a su creador y lo convierte en popular. Cualquiera conoce una lista de afamados arquitectos y la razón estriba en su afán por transmitir a través de las obras, que es la actitud que les aporta la presencia social que a los ingenieros les falta.



Foto 2. Puente de la Granadilla, en la isla de Tenerife. Tablero.

Es perfectamente perceptible la pérdida de protagonismo social del ingeniero, y resulta obvio que en el mundo actual, un colectivo olvidado o ignorado tiene poco que hacer. Por eso la ingeniería debe hacer un esfuerzo por recuperar el papel público que tuvo en otra época y para ello no existe quizá otro camino que reflexionar sobre los errores sociales y proponer la rectificación necesaria.

Habría que comenzar por preguntarse si, en el caso de los puentes, sus autores están en la senda adecuada o la torpe interpretación del papel exclusivamente funcional de las estructuras contribuye a conducirlos al olvido social. Porque difícilmente tendrán reconocimiento público si no aportan en sus estructuras aquello que la sociedad demanda y se empeñan en darle a cambio solo lo que ellos creen adecuado.

Desde un punto de vista ético, el protagonismo de los ingenieros puede ser un objetivo a lograr para su colectivo, pero nunca debe ser el único motor que conduzca a puentes enriquecedores del paisaje bajo la condición de puentes escultura. La sociedad tiene derecho a un paisaje antrópico cuidado, sensible y con vocación de trascendencia. Para ello, necesita autores con alma. Y esa relación, que es beneficiosa en ambas direcciones, solo debe tener un impulso: la creación de hermo-

sos entornos a partir de bellas estructuras por creadores sensibles y con vocación de artistas. No hay que perder de vista que el afán por alcanzar la notoriedad a través de las estructuras puede llevar a llenar el territorio de engendros que solo pretenden llamar la atención, como desgraciadamente ha sucedido con cierta frecuencia.

### LAS BASES DE UN PROYECTO

La concepción ingenieril clásica del proceso creativo se ha sustentado tradicionalmente en dos pilares fundamentales: la función y la economía. Todo cuanto se concibe primero y construye des-

pués ha de servir para hacer posible la misión para la que se crea. También debe tener un precio razonable, no necesariamente mínimo. Así, un puente tiene como misión la de resistir los pesos y cargas que gravitan sobre él y, en todo caso, ha de costar lo justo, lo que conlleva a concebirlo a través de su sistema constructivo y eliminar todo aquello que sea superfluo.

Aunque en los últimos años su imagen como objeto artístico ha comenzado a pesar en la mente de los diseñadores, siempre ha estado subordinada a los dos pilares citados. Salvo raras excepciones, el mensaje que

el autor pueda dar a la sociedad a través de su capacidad de expresión ha sido prácticamente ignorado en el proceso de creación. Un ingeniero al viejo uso se limita a diseñar una obra funcional y constructivamente correcta, y espera recibir por ello el reconocimiento de los demás.

Paradójicamente, la sociedad no otorga a la función un trato especial digno de consideración. El ciudadano da por hecho que las obras de ingeniería han de funcionar bien. Todo funcionamiento correcto es percibido como algo natural, una obligación cumplida sin más. Aquello que tiene disfunciones se tilda de chapuza. Ni un niño se asombra de que un avión vuele, los mensajes telefónicos lle-



Foto 3. Forma esculpida por la erosión en el material volcánico. Parque Lunar en Granadilla de Abona.



**OHL, referente internacional  
en construcción de infraestructuras  
del transporte**

**OHL, world leader in construction  
of transport infrastructures**



**OHL**

[www.ohl.es](http://www.ohl.es)

The **strength** of a **great international  
construction and concessions group**





Foto 4. Alzado del Puente de la Granadilla en el parque lunar del mismo nombre.

guen a su destino y la televisión ofrezca perspectivas del otro extremo del planeta en tiempo real. A nadie se le ocurre pensar que el técnico que crea tanta maravilla, la instala o conserva deba tener una especial relevancia social. Hacerlo es su obligación y para ello cobra. Y si fracasa, que se atenga a las consecuencias para someterse a continuación a la exigencia de responsabilidades. Que un puente se construya sin accidentes, se mantenga en el aire, no se desplome, sea cómodo de cruzar y se integre en un esquema circulatorio fluido son exigencias públicas, nunca mérito que despierte aplausos.

La asunción de costo mínimo también merece comentario. La ingeniería civil moderna vio la luz en el siglo XIX, en una Europa casi medieval, de hambrunas, cólera e injusticia social. Esos primeros ingenieros se enfrentaron a la colosal tarea de vertebrar un territorio carente de todo, y no tuvieron otra alternativa que exprimirse el cerebro para construir sin medios materiales ni económicos. De ahí surgió la obsesión por realizar obras de costo mínimo que ha movilizado y prestigiado a toda la profesión. El planeta se ha llenado de realizaciones austeras, eficaces, sin la menor concesión al paisaje ni la belleza. Mientras que a nadie se le ocurría construir edificios sin fachada ni aspecto cuidado con materiales nobles, para embellecer las ciudades, los puentes se alumbraban con una absoluta economía de medios estéticos.

¿Por qué no sigue de actualidad ese viejo discurso que supuso tantos logros y éxitos? La sociedad global actual es muy diferente. Aunque gran parte del primer mundo se encuentra en una crisis económica, que tiene en un segundo plano la inversión en infraestructuras, el conjunto de economías pujantes quiere parangonarse con las sociedades más avanzadas, desea vertebrar

sus países con eficacia y pretende cuidar su territorio con obras civiles de primer nivel. En general, la escala de valores del ciudadano desarrollado es ambiciosa y aunque practique la austeridad, no pretende llevarla a sus últimos extremos. La importancia de enriquecer el paisaje y llenarlo de dignidad es un valor universal al que todo el mundo aspira. Es obvio que el criterio de prioridades en la concepción de una obra debe adaptarse a los nuevos tiempos.

Un buen ejemplo de esa nueva perspectiva lo constituye el hermoso muestrario de puentes erigidos en España, que ya tras su guerra civil, cuando trataba de reconstruir un país

nuevo y moderno con escasos medios y mucho ingenio, no olvidó la importancia de mantener la belleza de un paisaje antrópico tan hermoso como el que le había legado la Historia. Ante ese reto, los ingenieros de Caminos y su filosofía de concebir nuevas obras brillaron de forma singular, porque a diferencia de otros países, la sensibilidad por la belleza del patrimonio histórico artístico hispano se ha reflejado en el cuidado de sus obras públicas.

En paralelo a la puesta en valor del paisaje, la sociedad no considera excesivamente el esfuerzo ingenieril por el ahorro a ultranza, porque tiene la percepción de que el técnico, cuando lo busca, no trabaja para ella, sino al servicio de las empresas que construyen. Sabe que, cuando se habla de una obra optimizada económicamente, nadie se refiere a la de menor costo social, sino a la de máximo beneficio para el constructor. Ese objetivo razonable tiene, por ello, poco impacto social. Cualquier ciudadano conoce las siglas de la constructora que ha hecho una determinada obra, supone que la ha erigido bien y ha ganado dinero, pero no tiene interés por los ingenieros que la han hecho posible ni cuál ha sido su papel en la gestión económica de la misma. Los equipara al personaje anónimo que diseña un televisor, un coche o un teléfono.

Esta circunstancia de desapego social y anonimato es, en gran parte, hija de la formación de los ingenieros, a quienes se ha inculcado que las obras pertenecen a todo un equipo y que es presuntuoso atribuir su paternidad a un autor único. En las escuelas de Ingeniería se ha criticado hasta la saciedad el narcisismo de los arquitectos que se irrogan en exclusiva, sin más, la autoría de obras participadas por diversos técnicos. Los ingenieros, en cambio, siempre han aceptado sin rechistar que sus construccio-

nes sean hijas del político que las promueve o inaugura y de la empresa constructora. Y eso los ha conducido a separarse tanto de la perspectiva de la sociedad, que no solo no valora su trabajo sino que los ignora.

Cuando un ingeniero utiliza como bases exclusivas de su proyecto la función y el coste, está asumiendo su papel de servidor social anónimo y, con ello, renuncia a dejar en el paisaje un trozo del alma humana.

## LA SOCIEDAD DE LA IMAGEN

Para la sociedad actual, la imagen es un elemento tan vital como la función o la economía. Hoy en día, las capacidades de la técnica se dan por supuestas. Nadie se sorprende de que un coche corra y no se averíe. Nadie aplaudirá a un vehículo porque sea capaz de frenar, es obvio que tiene que hacerlo, y todo el mundo sabe que la competencia ajustará automáticamente el precio. El factor que decidirá al final la calificación del producto es, sin duda, su imagen.

El mundo desarrollado no es el empobrecido del XIX donde lo importante era subsistir. Para los ciudadanos, la imagen, el paisaje y la belleza se han convertido en elementos muy importantes de satisfacción colectiva. Y los puentes son obras tan perceptibles, mucho más que las de arquitectura, cuyo impacto estético es enorme. Se quiera o no, influyen en el paisaje de forma decisiva. Tanto que se puede llegar a pensar, a la hora de proyectar, que el ingeniero asume la tremenda responsabilidad de compartir con Dios la tarea de modelar el planeta para hacerlo más amable a la especie humana, tanto desde el punto de vista de la función como de la imagen.

Cualquier incidencia en el paisaje provoca una tormenta de sentimientos en las gentes: horror, emoción, belleza, armonía, indiferencia, depresión, entusiasmo... Por eso, cuando se diseña un puente, se está emitiendo con su imagen, consciente o inconscientemente, un torrente de mensajes a sus futuros espectadores. Es como si se escribiera con él un gran libro y, a través de sus enormes páginas, se comunicara a la sociedad las sensaciones que el autor pretende despertar.

Los espectadores y usuarios de los puentes, actuales y futuros, los juzgarán como elementos visuales y, dando por supuesto que habrán resuelto el problema de la función, querrán no solo que no sean

agresores del entorno, sino que lo ennoblezcan y enriquezcan. Y lo más importante de esa aspiración social es que la sociedad está dispuesta a pagar por ello. Cada obra debe tener un coste social mínimo, pero uno de los capítulos del presupuesto, obviamente no desorbitado, debe ser su imagen.

A pesar de esta realidad, muchos ingenieros tienen pavor a la importancia de la forma. Quizá sea porque un sector de la sociedad, no mayoritario pero si vociferante, ha criticado tanto las agresiones paisajísticas de obras públicas realizadas desde la función y la economía sin la sensibilidad de la imagen, que ponen en cuestión cualquier obra nueva. Con la frecuente dejadez hacia la belleza no solo se ha perdido protagonismo, sino que se ha generado también un amplio rechazo al impacto de las grandes construcciones.

Ante las opiniones adversas que han despertado bastantes puentes desafortunados, la tentación de muchos ciudadanos, agrupados en colectivos muy influyentes, es la de no construir más. Pero como esa es una postura incompatible con el desarrollo, otros muchos recomiendan la regla aparentemente infalible de que en las nuevas construcciones se intente pasar desapercibido. Es algo así como si la mejor imagen para una obra de ingeniería fuera la invisibilidad.

Y como no existe receta para ello, se llega a la conclusión frecuente de que la obra más sencilla posible es la que impacta menos en el paisaje. Y eso no es verdad, estas realizaciones tienen tales dimensiones, tal envergadura, que la vulgaridad no disimula su apariencia en el lugar donde se incardina, sino que lo empobrece.



Foto 5. Detalle de la cabeza del dragón del Puente El Guardián del Castillo. Alcalá de Guadaíra, Sevilla.

Por otra parte, pretender que la actuación del hombre no cambie el paisaje natural es una batalla perdida de antemano. El crecimiento de la población y sus necesidades obligan a realizaciones a gran escala que, se quiera o no, modifican la percepción, humana por otra parte, de los escenarios naturales. El paisaje solo tiene sentido bajo la óptica de nuestra especie. Por eso, con la conciencia de que lo que hacemos se va a ver inevitablemente, hagámoslo hermoso. Y si sabemos que va a despertar sensaciones, utilicémoslo como medio de expresión visual.

## QUÉ HACER

Tras estas reflexiones provocadoras se llega a la conclusión de que en un puente se debe introducir el concepto escultórico para responder al papel importante que juega la imagen en la sociedad actual. Por mucho que cueste admitirlo, los puentes son enormes objetos arquitectónicos, con imagen, creadores de paisaje y comunicadores de sentimientos al espectador. Y, o se toma en serio la tarea de asumir conscientemente esta cualidad de nuestros puentes o acabarán en manos de otras profesiones que cuidarán el aspecto y contarán con ingenieros anónimos para resolver la dura tarea de resistir y erigirse.

El mundo de la imagen es difícil y muy ajeno a los ingenieros. Hay que aprender a subsistir entre críticas, envidias, corrientes, modas y sectas. En muchas ocasiones es preciso alinearse para sentirse arropado por unos cánones y reglas que justifiquen la forma de expresión. Y, sobre todo, exige salir del anonimato. Ese anonimato

donde la ingeniería se ha recluido voluntariamente, amparada por siglas de constructoras y consultoras.

En las escuelas técnicas se enseña erróneamente que la modestia es virtud. Sin embargo, la sociedad actual aprecia más una obra con firma que otra anónima. ¿No vale tanto la rúbrica de una obra de arte, si el autor es afamado, como la creación en sí? El éxito rotundo de la arquitectura en su pugna profesional con la ingeniería radica precisamente en su protagonismo. El anonimato no conduce a otra cosa que a minusvalorar sus obras. ¡Qué inmenso error el cometido con la modestia y la despersonalización! Cualquier alumno de Arquitectura es capaz de citar a veinte famosos arquitectos. ¿Se podría decir lo mismo en las escuelas de ingenieros? Todos los días aparecen en las revistas y medios arquitectos de prestigio, en cambio, los pontífices ni existen.

Es urgente acabar con ese olvido y para ello hay que alumbrar una nueva clase de ingenieros. Buenos profesionales, animados por el rigor y el conocimiento del que siempre han hecho gala, pero dispuestos a buscar el protagonismo, preocupados por dialogar con la sociedad a través de sus obras, dándole lo que ella demanda: honestidad, calidad técnica y calidad formal.

## LOS ELEMENTOS DE LA FORMA

Y ahora llega la gran pregunta: Si un puente tiene también la condición de escultura, ¿se tiene que limitar al uso de elementos exclusivamente resistentes o puede incorporar al diseño otros más ornamentales? ¿Qué o quién lo impide?

A esa cuestión ya habían respondido los pontífices anteriores al XIX a base de llenar de expresividad y armonía el espacio que acogía sus obras. Para ello, no dudaron en incorporar a su diseño elementos propios de la edificación. Sin miedo a contaminar el papel estructural de sus arcos, dinteles y pilas, usaron profusamente esculturas, frisos, relieves, revestimientos, torres y puertas en busca de la creación de un monumento urbano que enriqueciera a la ciudad que lo albergaba. El puente del Rialto, en Venecia, o el Pont Valentré de Cahors, en Francia, son ejemplos bien conocidos. ¿Qué ha ocurrido para que se haya perdido una concepción formal que era habitual hace cien años?



Foto 6. Puente El Guardián del Castillo. Vista nocturna con el castillo almohade al fondo.

Cuando el ingeniero descubre el hormigón y el acero, ambos materiales irrumpen en la expresión de las construcciones con la vocación de tener un lenguaje propio. La belleza de una estructura pura, bien proporcionada y con un claro mecanismo resistente, sobre todo si es osado, permite prescindir de los elementos complementarios a los que antes había que recurrir si se pretendía conseguir la belleza y despertar la emoción. Orgulloso de los nuevos materiales, el diseñador abandonó todo aquello que vistiera y ocultara una imagen tan osada, valiente y novedosa que dejaría boquiabierto a cualquiera que contemplara el nuevo alarde estructural.

Durante todo el siglo XX se han realizado puentes bellísimos sin otra herramienta que la estructura. Las concesiones formales se han limitado a la directriz y sección de los elementos resistentes y el resultado ha sido en muchos casos tan espectacular que a nadie se le ocurre hacer nuevos puentes tan hermosos como el Alejandro III de París, con un increíble arco escarzano ornado con guirnaldas de fundición y columnas con ángeles en los estribos.

A principios del XXI, el afán por la estructura desnuda como único medio de expresión sigue vigente. Y es cierto que continúa aportando una magnífica solución estética para puentes de gran luz. La estructura gigante brilla con luz propia con la limpieza de líneas, la osadía en la esbeltez y la calidad de los materiales estructurales. Sin embargo, en los puentes de corta o mediana envergadura, esa doctrina conduce a resultados más que discutibles.

Hay puentes de cuarenta metros de luz que podrían ser resueltos con cuatro vigas de catálogo, convertidos por el afán de la estética mal entendida en mecanos truculentos, que despliegan un disparatado muestrario de recursos estructurales propios de puentes grandes, pero ridículos en los pequeños, como son los cables, tirantes, arcos inclinados, etc. Al ingeniero le horripila usar un revestimiento o un adorno, pero no le avergüenza usar elementos resistentes innecesarios y aparatosos.

La limitación exclusiva a los elementos estructurales conduce al que busca un diseño original a emplear recursos injustificados desde el punto de vista resistente, pero que le dan la apariencia de ser un alarde mecanicista. ¡Qué angustia la del ingeniero conminado a hacer una obra llamativa sin otros recursos que los de la Resistencia de Materiales, en aquellos casos frecuentes en que las leyes de la estática conducen a una solución vulgar! ¿Quién le



Foto 7. Puente El Guardián del Castillo en Alcalá de Guadaíra. Tablero.

impide recurrir a otro tipo de elementos no necesariamente de aspecto estructural para conformar una obra bella?

Un puente debe funcionar bien como elemento vial de comunicación, debe resistir durablemente los esfuerzos, ha de tener un costo razonable, lo que implica una construcción viable, y tiene que ser un objeto paisajístico, notorio, bello, capaz de articular un lenguaje perceptible por el alma humana. Para ello, el ingeniero diseñador dispone de todo cuanto se le ocurra: estructura, forma, revestimientos, esculturas, colores, edificios... A él lo único que hay que exigirle a cambio es imaginación, creatividad, sensibilidad y, por supuesto, protagonismo. Después será la sociedad, juez implacable de la hermosura, la que bendecirá o condenará su obra.

## ESTRUCTURAS ÉPICAS

Todas estas reflexiones han influido de forma decisiva en la manera de abordar el proyecto de puentes urbanos. ¿Con qué directrices? ¿Con qué corriente estética?

Como dentro de la doctrina que acabamos de exponer caben mil y una trayectorias profesionales, corresponde a cada proyectista elegir su camino, bien dentro de una corriente plástica, bien en solitario. La estética en una obra tiene muchas interpretaciones y cada ingeniero o equipo de ingenieros adoptará la suya en función de sus gustos, su forma de ser o su manera de interpretar la vida.

A la hora de proyectar estructuras, el autor puede inclinarse por adoptar un nuevo estilo o seguir alguna de



Foto 8. Infografía de la vista frontal del Puente Abbas Ibn Firnas.

las corrientes y modas que pululan por el panorama del diseño. Los arquitectos siguen tendencias, se apuntan a movimientos y se afilian a estilos como si de una religión se tratase. Pero el mundo de las estructuras está poco sistematizado.

El postmodernismo y el minimalismo han tendido a eliminar la expresión formal de la estructura que, o se oculta vergonzosamente o pasa desapercibida con la austeridad de la línea recta, el gris del hormigón o el cárdeno del acero cortén.

Santiago Calatrava utiliza la estructura como elemento escultural. Esculpe sus formas gigantes, animales o vegetales, como mallas estructurales de elementos ahusado de color blanco que aparentan una función resistente, la cual la mayor parte de las veces no es tal. No cabe duda de que tiene partidarios y detractores, pero también de que ha revolucionado el ámbito de la imagen estructural y se ha abierto un lugar de protagonismo mundial indiscutible. No hay que olvidar que la controversia es consustancial con la arquitectura.

Al amparo de su proyección han surgido muchos imitadores que montan gigantescas estructuras utilizando elementos tecnológicos, vigas, cables, tensores, columnas, tornapuntas... para montar tramoyas complejas que aparentemente tienen una misión estructural, pero que son superabundantes y buscan más el efectismo que responder a una solución funcional, elegante y desprovista de elementos resistentes superfluos.

Calatrava aprovecha cada encargo para erigir una escultura que sirva como puente. Tras él, insignes ingenieros, como Manterola, han seguido la senda de aprovechar los elementos resistentes para esculpir elegantes formas en el espacio, y lo han logrado sin tener que renunciar a la verdad estructural de Torroja. Aunque procuran eludir concesiones a la imagen distintas a la elegancia de la esbeltez de los elementos resistentes, cada vez

con más frecuencia introducen elementos que buscan expresamente proporcionar un objeto bello.

En el reino de los puentes urbanos poco más hay que decir. Apenas le ha llegado la revolución reciente de la forma por la forma que está sufriendo la arquitectura con expresiones desestructuradas, volúmenes amorfos y superficies degradadas que

antes parecerían demenciales y hoy tienen un éxito social indiscutible. El primer experimento en este sentido ha sido el pabellón puente de la Expo de Zaragoza con la solución premiada de Zaha Hadid y la presentada por el autor de este artículo al concurso, con menos éxito que la iraní.

Llegados a este punto, confesaré que siempre me he sentido un tanto independiente y que me ha apetecido más buscar mi propio camino que seguir por sendas trilladas por otros. Y siendo consecuente, he emprendido con mi equipo una nueva vereda que nos ha conducido a una forma personal de concebir las estructuras urbanas. Nuestros diseños se caracterizan por su génesis, que provoca un muestrario de soluciones que hemos bautizado como "estructuras épicas".

La idea de que con un puente se pueden expresar y transmitir sensaciones se materializa necesariamente de forma diferente en cada autor. La necesidad de expresión íntima a través del diseño es tan variopinta como el espectro de almas, personalidades y aspiraciones intelectuales que existen en una profesión. En nuestro caso, el afán por la épica, la afición al relato de historias, la vocación de juglar contador de leyendas, han marcado nuestra forma de ver los puentes. Cuando se considera que todo es épico, es imposible sustraerse a transcribir al papel las historias que la vida ofrece o insinúa ante nuestros ojos. Y a la vez que se redactan relatos que nacen de la imaginación, también se novela la existencia misma.

Pues bien, ¿es posible trasladar ese espíritu de creador de historias del papel a la estructura? Si nuestras obras tienen un lenguaje, una semántica que sirve para transmitir sentimientos al espectador, ¿no pueden contar una historia? Así que un día, sin saber muy bien cómo, cristalizó la respuesta a esa pregunta: comenzamos a diseñar estructuras épicas. Estructuras cuya forma viene dictada por una historia con tintes poéticos que surge en la mente del creador al unísono con el diseño.

Un puente, sobre todo si es urbano, siempre tiene carácter monumental, tanto por sus dimensiones, mayores que el resto de las edificaciones del entorno, como por constituir un objeto de carácter histórico, vinculado a una época, un gusto y unas costumbres. Pero también puede adquirir esa condición si se contempla bajo la tercera acepción de la Real Academia de la Lengua para los monumentos: obra pública y patente erigida en memoria de algo singular.

Muchos puentes reciben esta tercera categoría al ser bautizados. Su nombre en memoria de un rey, una efeméride o un prohombre los transforman en monumentos homenaje a quienes los denominan. Si embargo, rara vez el motivo que les da nombre influye en su diseño. Aunque en el campo escultórico suele vincularse el homenajeado a la imagen, en el caso de los puentes, la funcionalidad, cuando no la falta de interés por esa trascripción formal de sus autores, disocia la forma del nombre.

Es lícito para un proyectista pensar que un nuevo puente debe estar inspirado en la ciudad o en el paraje donde se incardina, en sus señas de identidad, y debe servir de expresión monumental y morfológica coherente con su historia y su cultura. Y ese objetivo se puede lograr de dos maneras: utilizando elementos formales extraídos del paisaje que formen parte de la expresión arquitectónica local o construyendo una nueva imagen a partir de una historia que simbolice de manera inequívoca un aspecto espiritual genuino del lugar donde se implanta, y que se materialice de forma palpable en el diseño estructural. De este último planteamiento surge el concepto de "estructura épica".

La épica está presente en todas las expresiones espirituales del ser humano; desde el género épico de los griegos ha formado parte no solo de la literatura, caracterizando la poesía o el teatro, sino que ha entrado a calificar la música, la pintura, la escultura y por qué no, la arquitectura. Frente a los cuadros líricos de un Matisse, con sus bailarinas volubles e indolentes como ramas caídas al ritmo de la música, el Picasso épico del Guernica nos habla de muerte, guerra y bombardeos. También existe una arquitectura épica cuando la influencia del contenido se refleja en el diseño del continente.

¿Por qué no pensar también en una estructura épica? Un puente cuya forma cristalice como consecuencia de una historia argumental, semblanza de una epopeya, que materializa en un monumento el relato que justifica su existencia. Como tesis es posible, aunque, obviamente, no carente de riesgos: la expresión material de la literatura corre el riesgo de la literalidad.

Cuando un ingeniero escribe relatos y percibe la existencia como una novela, la idea es tentadora y le resulta difícil resistirse ante el atractivo de concretar una historia, no solo en frases, sino en hormigón y acero.

Un puente épico no es así otra cosa que una estructura cuya forma viene inspirada por un relato literario, histórico o imaginado, vinculado al lugar y al paisaje donde se ubica, que se manifiesta sugerente para las generaciones venideras.

Como todo en la vida, habrá estructuras épicas hermosas y otras que serán adefesios o delirios de la razón. Tendrán partidarios y detractores. Con seguridad, los amantes del minimalismo repudiarán tanta concesión a la imagen, pero en el terreno de la semántica estructural hay que contar con la controversia, las discusiones, adhesiones y rechazos. Y para evitar el riesgo del barroquismo estructural, es necesario mantener incólume el respeto por una estructura limpia y clara, sin elementos resistentes superfluos.

Las estructuras épicas pueden tener concesiones a la forma, el color o el revestimiento, e incorporar al diseño elementos ornamentales, pero han de funcionar bien como estructuras y tienen que ser económicamente asumibles.

En los últimos años hemos proyectado en AYESA algunos puentes épicos. Unos se han construido y nos han proporcionado la satisfacción de tener una amplia acogida popular. Alguno no ha conseguido vencer en el



Foto 9. Vista panorámica del Puente Abbas ibn Firmás sobre el río Guadalquivir.



*Más de cincuenta años  
construyendo futuro.*

*Over fifty years building the  
future.*



[www.grupocopisa.com](http://www.grupocopisa.com)



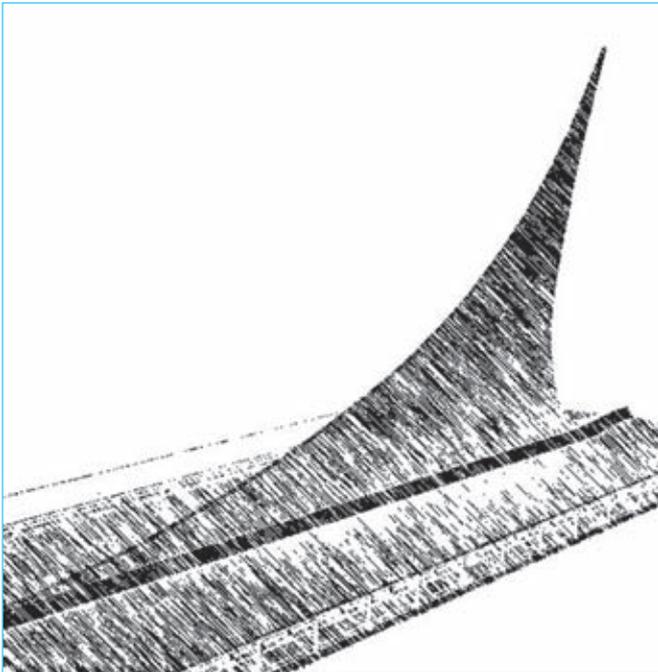


Foto 10. Puente de la Granadilla. Dibujo a plumilla.

concurso al que fue presentado. Pero en todos hemos disfrutado al poder materializar en un diseño aquello que nos conmovía. A fin de cuentas, la última razón de ser de la creación.

## PUENTES ÉPICOS

Como ejemplo de puentes épicos, vamos a mostrar en este artículo tres realizaciones.

La primera es un puente sobre autopista, en Tenerife. Sirve de acceso a un parque eólico que convocó un concurso de ideas para lograr un hito que sirviera de imagen a las instalaciones y al que se presentó la flor y nata de la profesión. Nuestra propuesta resultó elegida por el jurado.

El puente simboliza la historia de unos atlantes que llegaron a la isla navegando sobre tablas con vela en busca del jardín de las Hespérides. El Teide, dragón mitológico, defendió a la isla de sus agresores cubriéndolos de lava. Sus restos petrificados aún permanecen en el parque lunar de la Granadilla, donde se implanta la estructura.

Una lámina vertical sustenta un tablero esbelto, en un puente de hormigón armado, de sencillo esquema resistente y costo adecuado al objetivo buscado por los propietarios

del parque. Hoy es considerado uno de los hitos turísticos referentes de la isla.

La segunda es un puente en Alcalá de Guadaíra, bella localidad próxima a Sevilla. Las autoridades urbanísticas decidieron hacer un viaducto, al pie del castillo almohade, emblema de la ciudad, y cruzando un parque fluvial bucólico y hermoso. La sensibilidad ambiental de los agentes sociales cuestionaba la viabilidad de una obra de tal envergadura en semejante paraje. Por eso, convocaron un concurso de ideas para elegir la solución de menor impacto y lograr a su vez la aprobación pública de la obra.

Nosotros pensamos que la única solución era erigir un objeto de parque urbano, que pudiera ser utilizado como puente. En los jardines públicos se construyen fuentes, esculturas, bancos, juegos infantiles y todo aquello que contribuya al esparcimiento. La solución que propusimos era construir un gigantesco animal de leyenda, con piel irisada y multicolor, incardinado en la historia del lugar. Debería alentar la imaginación de los niños que allí jugaban y constituir un bello marco que hiciera honor a la hermosura del emplazamiento.

Para el diseño nos inspiramos en la leyenda del dragón que salvó al hijo del califa Abu Yacub ben Yusuf del ataque de los almorávides y ayudó a la comitiva real a cruzar el cauce del río Guadaíra. La idea de hacer un puente figurativo puede parecer extravagante desde la óptica puramente funcional del ingeniero, pero nuestra pretensión era la inversa: erigir una escultura que pudiera ser utilizada como puente.

Hoy, el puente del Dragón de Alcalá, que ha creado escuela, constituye un motivo de orgullo para sus habitantes, lugar de visita obligada para los turistas, centro de celebración de fiestas locales y alimento permanente de la fantasía de los niños que juegan a su alrededor.

La tercera es otro puente, de mayores dimensiones, sobre el Guadalquivir en Córdoba, que rinde homenaje al ingeniero Abbas ibn Firnás del siglo IX.

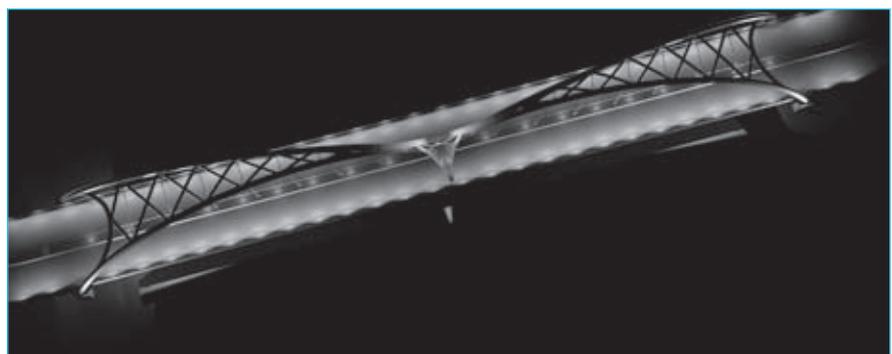


Foto 11. Arco del Puente Abbas ibn Firnás.

La responsabilidad de erigir un gran puente en el entorno urbano de una ciudad obliga a incluir la componente monumental en su diseño. Una gran urbe se configura a lo largo de la historia con los monumentos que las distintas generaciones han ido dejando en su paisaje. Un puente sobre el río que la baña no puede renunciar a esa condición, y su diseñador tiene la obligación de transferirle el carácter de patrimonio que ese emplazamiento exige.

Normalmente, los puentes urbanos se levantan en honor a alguna figura relevante y se bautizan con el nombre de un rey, príncipe o héroe vinculado a la ciudad. La ligazón formal entre el homenajeador y la estructura suele ser inexistente o se limita a integrar una escultura o un grabado con la imagen del personaje que otorga su nombre. En este caso, cuando comenzamos el diseño, decidimos honrar la memoria de la Córdoba califal, capital del mundo en el siglo noveno, en la figura de uno de sus próceres.

La ciudad cordobesa se caracterizó por su papel intelectual y su capacidad para irradiar la cultura desde sus murallas al orbe entero. Sus bibliotecas, poetas y sabios fueron faro de luz que iluminó un mundo sumergido en las oscuridades medievales. Entre todos ellos destacó la figura prodigiosa de un ingeniero, matemático y científico de alcurnia bereber que aportó un sinfín de conocimientos al saber de la época.

Abas ibn Firnás, impulsor de la cristalografía, inventor del reloj mecánico, autor de planetarios, fue el padre de la aviación. Estableció una teoría del vuelo que se atrevió a confirmar lanzándose con alas de pluma desde la torre de La Rusafa. Sobrevivió para asombro de sus coetáneos. Su hazaña es reconocida en todas las universidades y su nombre preside una cátedra en Houston y una sala en el Museo de Ciencias de Moscú.

Nuestro puente, con dos arcos tridimensionales, simulando dos gigantescas alas, levanta en el centro la figura abstracta del que impulsó un gran salto para la humanidad. Es una estructura épica, que narra con su forma la proeza del primer vuelo de la Historia.

## EPÍLOGO

El camino para tener puentes con identidad, que sirvan como medio



Foto 12. Puente de la Granadilla. Perfil.

de expresión de la creatividad, pasa por convertir al ingeniero que los diseña en un protagonista social a través de un proceso largo y lleno de obstáculos. Significa un reto y plantea la dificultad de un cambio colectivo de mentalidad. Hay que despertar en los alumnos de las escuelas el sentido artístico, el afán por la cultura, la sensibilidad social y la vocación por salir del anonimato. También hay que animar a los proyectistas a perder el pudor, liberar sus sentimientos y saltar a la palestra pública con el nombre de alguien que tiene algo que decir.

Es una tarea muy difícil. Pero si algo caracteriza a la profesión de pontífice es su enorme capacidad de resolver problemas y afrontar retos con éxito. Estoy convencido de que existe la meta y solo hace falta encontrar el camino. Pero en eso somos expertos...

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Artículo "El puente El Guardián del Castillo", Revista *Carreteras* N° 161 (septiembre – octubre 2008). 

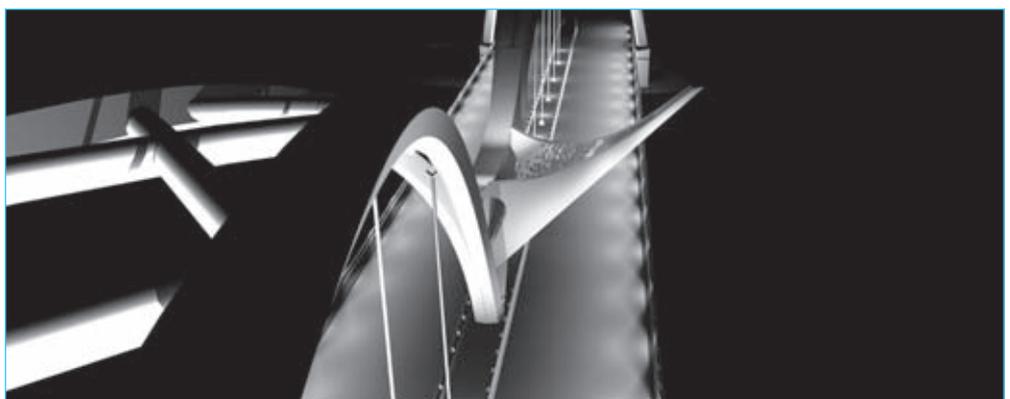


Foto 13. Puente Abbas ibn Firnás visto desde arriba.

# Gestión de las autopistas para mejorar la eficiencia energética

Andrés MONZÓN  
Natalia SOBRINO  
Sara HERNÁNDEZ

*Centro de Investigación del Transporte  
Universidad Politécnica de Madrid*

## RESUMEN

*Los efectos del transporte en el cambio climático se han convertido en un motivo de preocupación en todo el mundo. El transporte representa el 41% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España, y aproximadamente el 65% de esa cifra corresponde al tráfico por carretera. Las autopistas de peaje se gestionan en la actualidad sobre la base de criterios económicos: minimizar los costes operativos y maximizar los ingresos derivados de los peajes. En este marco, el presente documento desarrolla una nueva metodología para gestionar las autopistas tomando como base un objetivo de máxima eficiencia energética. Incluye las políticas tecnológicas y las impulsadas por la demanda, que se aplican a dos casos prácticos. Este estudio arroja varias conclusiones. Los resultados indican que para reducir al máximo la huella de carbono es preciso diseñar estrategias de sostenibilidad para gestionar cada tramo de autopista. Esto significa utilizar el máximo de su capacidad según los flujos de tráfico total de automóviles y de vehículos pesados en las autopistas y también en las carreteras paralelas. Otra importante conclusión es que se podrían lograr importantes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero en los tramos con peaje aplicando programas de ETC (cobro electrónico de peaje) y ORT (peaje abierto).*

**Palabras clave:** *Eficiencia energética, Gestión del tráfico, Operación de plazas de peaje.*

## INTRODUCCIÓN

Todo el mundo reconoce que el transporte es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) -concretamente de CO<sub>2</sub>- que se relacionan directamente con el consumo de combustibles a base de carbono. El sector del transporte aporta beneficios sociales y económicos a la sociedad en su conjunto y, no obstante, es la causa de una serie de efectos medioambientales negativos. El sector del transporte genera un elevado porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub>: hasta un 23% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> por la quema de combus-

tibles fósiles y el 15% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) en todo el planeta (IFT/OCDE, 2010<sup>(1)</sup>). El transporte por carretera representa el grueso de las emisiones del transporte, es decir, en torno al 75% de todo el mundo (AIE, 2009<sup>(2)</sup>). En España, el aumento de la demanda de transportes -especialmente de las modalidades de transporte por carretera- es la principal causa del aumento de las emisiones de GHG (Mendiluce y otros, 2011<sup>(3)</sup>). Entre 1990 y 2009, el volumen del tráfico en España ha aumentado un 94% y, en consecuencia, las emisiones de GHG del transporte por carretera se han incrementado un 65% durante ese periodo (Ministerio de Fomento, 2011<sup>(4)</sup>). Los países han

aumentado su dependencia energética y, por ende, sus efectos no solo en el medio ambiente, sino también en la economía: los precios del crudo, los impuestos, los costes externos, etcétera. Por este motivo, y con el fin de cumplir el objetivo del Protocolo de Kioto de reducir las emisiones de GHG a los niveles de 1999, se han aplicado tanto a escala nacional como internacional diversas políticas concebidas para disminuir el consumo energético en el sector del transporte por carretera con medidas de planificación y operativas. Además de continuar promoviendo los esfuerzos con respecto a las normas sobre eficiencia de los combustibles, la promoción de nuevos vehículos eficientes, la conducción ecológica, el cambio de los comportamientos hacia unos modos más eficientes, etcétera, se debe prestar atención a las autoridades y a los operadores de las carreteras, dado que en sus manos está el potencial de gestionar la red viaria de una forma segura, fiable, económica y sostenible. Se debe tener en cuenta este último aspecto -contribuir más a la sostenibilidad y a la eficiencia energética global- en un nuevo enfoque sobre la gestión de las carreteras cuyo objetivo sea reducir el consumo energético en la red viaria de los flujos de tráfico.

Se debería definir una nueva gestión eficaz para ayudar a que las autoridades viarias y los interesados optimicen el consumo energético y los efectos del CO<sub>2</sub> durante la fase de servicio de las carreteras. Los ahorros energéticos aún están lejos de formar parte de la estrategia operativa de las redes de autopistas. A los gestores de las autopistas les preocupa sobre todo reducir los costes y los accidentes, pero la reducción del consumo energético no figura aún en su agenda, ni en la fase de construcción ni en la de servicio. Por otra parte, el desarrollo de sistemas nuevos y más eficaces de ITS para el pago y control proporcionan herramientas para una mejor gestión con soluciones que se podrían adaptar a cada caso práctico concreto.

Este documento tiene como finalidad demostrar que se podría aplicar un enfoque distinto. Es posible obtener beneficios considerables aplicando estrategias de eficiencia energética en la gestión de redes viarias más importantes. El documento está estructurado como sigue: El apartado 2 trata el cálculo de la huella de la carretera como nuevo enfoque en la gestión viaria. Los apartados 3 y 4 describen las principales variables que se deberían tener en cuenta para optimizar la huella de la auto-

pista en dos estrategias seleccionadas de reducción de GHG. A continuación se validan varias aplicaciones normativas en dos casos prácticos diferentes. Por último, se obtienen ciertos resultados que constituyen la base para proponer nuevas estrategias para reducir las emisiones de carbono en las autopistas.

## HUELLA DE LA CARRETERA: UN NUEVO ENFOQUE DE GESTIÓN VIARIA

Se puede definir la huella de carbono de una carretera como la cantidad total de CO<sub>2</sub> y otros GHG emitidos durante todo el ciclo de vida de una carretera (fases de construcción, servicio, mantenimiento y demolición). Sin embargo, este documento solo trata la operación de la carretera que gestiona los flujos de tráfico emisores de CO<sub>2</sub> debido a la quema de combustibles. Se utilizan modelos de consumo energético y emisiones para calcular la huella de la carretera en la fase de servicio. Estos modelos proporcionan una herramienta objetiva para valorar las medidas, las estrategias y los escenarios, y pueden integrar la gestión de la huella energética, la calidad del aire y la eficiencia energética en los procesos de toma de decisiones (Affum y otros, 2003<sup>(VI)</sup>). El consumo energético -y en consecuencia las emisiones de CO<sub>2</sub>- depende de una serie de parámetros como el trazado de la vía (tipo de carretera y gradiente), su estado, el reparto de los flujos de tráfico, del grado de congestión, etcétera. A estos efectos se han desarrollado muchos modelos (Smit y otros, 2010<sup>(VII)</sup>) que tienen en cuenta las características de la carretera y del tráfico. Otros modelos se basan en la aplicación de principios mecánicos al cálculo del consumo energético y de las emisiones (Burgess y Choi, 2003<sup>(VIII)</sup>; Janic, 2007<sup>(VIII)</sup>; Zachariadis,



Figura 1. Estructura del modelo de emisiones de CO<sub>2</sub> de los flujos de tráfico en autopistas.

# Paneles LPT de mensaje variable

Los paneles LPT (Low Power Technology) de mensaje variable son una aportación tecnológica I+D+i del Grupo Postigo a la seguridad vial, en el marco de las políticas mundiales de ahorro energético y sostenibilidad.

Su bajo consumo de energía es inferior a **300 W** en un panel 64x64 con mensaje de mayor número de leds encendidos.

## Menos Consumo + Vida



- *Reducen más del 85% el consumo de energía.*
- *Requieren acometidas sencillas y secciones mínimas de cable.*
- *Ahorran inversión económica en instalación, operatividad y mantenimiento.*
- *Permiten alimentación autónoma con energías renovables.*
- *Contribuyen a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.*
- *Proporcionan alta eficiencia y alargan la vida de los leds (100.000 h = 11 años).*
- *Disponen de Certificado para Mercado CE en la norma europea EN12966, que incluye recomendaciones para la selección de paneles con criterios de eficiencia energética.*

 GRUPO  
**POSTIGO**

[www.grupo-postigo.com](http://www.grupo-postigo.com)  
[info@grupo-postigo.com](mailto:info@grupo-postigo.com)



Ntziachristos y Samaras, 2001<sup>(xv)</sup>). Estos últimos determinan el consumo energético en proporción a las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, incluida la resistencia al rodaje, el flujo aerodinámico y la resistencia a la penetración del aire, así como las pérdidas por inercia y gravitacionales.

Las emisiones totales de CO<sub>2</sub> de los flujos de tráfico en una autopista dependen de distintos factores, tal como muestra la línea A de la Figura 1. La intensidad del carbono depende de las normas sobre eficiencia del combustible, que en la actualidad son el instrumento en política de transporte más utilizado para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia del petróleo (Creutzig y otros 2011<sup>(xvi)</sup>). La demanda se relaciona con un uso más racional del vehículo. Medidas como la conducción ecológica, el cambio modal a formas de transporte más eficientes, etcétera, pueden controlar la demanda (Pérez-Martínez y otros, 2011<sup>(xvii)</sup>). Por último, los factores del consumo dependen de la velocidad, del gradiente de la carretera y del tipo de vehículo, que son las principales variables fijas para calcular la huella de la carretera (línea B de la Figura 1) y para gestionar esa carretera (Monzón y otros, 2012<sup>(xviii)</sup>).

Con el fin de optimizar la huella de la carretera, la línea C de la Figura 1 representa las medidas que influyen en las emisiones totales de CO<sub>2</sub> de los flujos de tráfico. Los operadores pueden actuar directamente sobre estas variables mediante estrategias que impliquen la gestión de la carretera con eficiencia energética. Recientemente, la limitación de la velocidad ha sido con mucho la estrategia más popular para reducir las emisiones de las carreteras y también la contribución a su seguridad (Int Panis, Broekx y Liu, 2006<sup>(xix)</sup>; Keller y otros, 2008<sup>(xx)</sup>; Keuken, Jonkers, Wilmink y Wesseling, 2010<sup>(xxi)</sup>). El diseño de la

carretera desempeña un papel esencial en la etapa del trazado y la construcción, ya que la pendiente es una variable directa. Fomentar la renovación del parque automovilístico es otra forma de promover un transporte por carretera que utilice la energía con eficacia (Aranda Uson y otros, 2011<sup>(xxii)</sup>). Por último, la gestión de la red integra todas estas acciones y tiene en cuenta el uso combinado de todas las rutas alternativas O-D.

Este apartado presenta dos estrategias distintas para mostrar el potencial de ahorro energético. Se han concebido estos casos prácticos con un enfoque más integrado para reducir la huella de las autopistas. Muestran dos tipos posibles de acciones normativas: el control de la velocidad y del tráfico entre las distintas alternativas viarias, por un lado, y reducir la congestión en las áreas de peaje con la ayuda de sistemas ITS, por el otro.

### CASO PRÁCTICO 1: MEJOR USO DE LA CAPACIDAD LAS AUTOPISTAS DE PEAJE

En muchos países los vehículos pesados o los turismos no utilizan las vías de peaje por el efecto disuasorio que tiene abonar un peaje. Esto es más evidente en los casos de problemas económicos que afecten a algunos conductores o a países concretos que padezcan situaciones de crisis económica. Esto provoca a su vez problemas obvios a las concesionarias de autopistas, porque el tráfico es mucho menor de lo esperado.

Con el fin de analizar este problema hemos seleccionado un itinerario que tiene dos vías alternativas: una carretera convencional (alternativa 1) y una de peaje (alternativa 2). El escenario se establece entonces

ESTRATEGIA DE GESTIÓN	ESCENARIO	DEFINICIÓN
	S 0	Escenario de referencia
Gestión del tráfico	S TOLL	Todo el flujo del tráfico se traslada a la autopista de peaje.
	S HDV	Todos los vehículos pesados de la carretera convencional se trasladan a la autopista de peaje.
Gestión de la velocidad	S SPEED ↓	-10 km/h: reducción de la velocidad en la autopista de peaje para los vehículos ligeros.
	S SPEED ↓2	-20 km/h: reducción de la velocidad en la autopista de peaje para los vehículos ligeros.
Gestión del tráfico + velocidad	S HDV+SPEED ↓	Se trasladan los vehículos pesados a la autopista de peaje + reducción de la velocidad en la autopista de peaje para los vehículos ligeros (-10 km/h)
	S TOLL+SPEED ↓	Se traslada todo el flujo del tráfico a la autopista de peaje + reducción de la velocidad en la autopista de peaje para los vehículos ligeros (-10 km/h).

Tabla 1: Estrategias de gestión propuestas en dos vías alternativas.

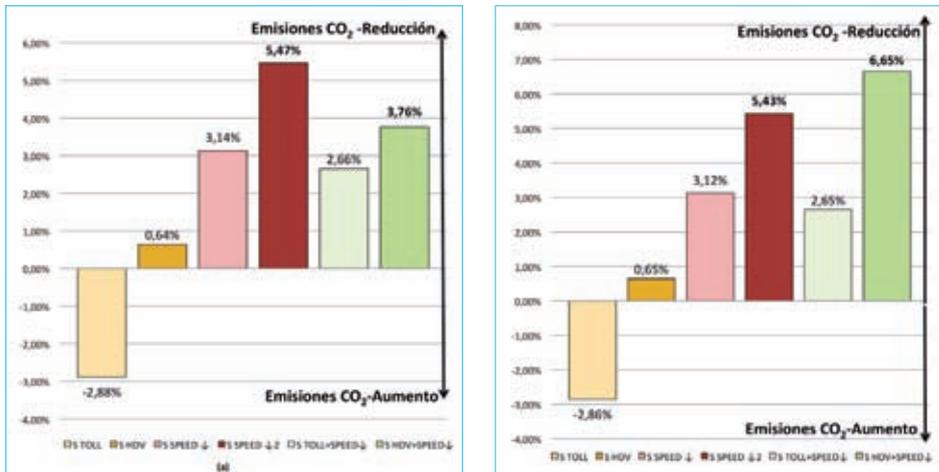


Figura 2. (a) emisiones de CO<sub>2</sub> y (b) ahorros de consumo energético (%).

vas junto con la integración de los flujos del tráfico y la gestión de la velocidad. Por el contrario, el escenario S TOLL muestra un aumento del consumo de combustible y energía y de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto se justifica por el hecho de que aunque las autopistas sean de mejor calidad, su velocidad es mayor si se compara con las carreteras convencionales, lo que aumenta la huella de la carretera. La

comparación de cada escenario con el de referencia S0 se recoge en la Figura 2. En los escenarios S SPEED ↓ y S SPEED ↓ 2, cuanto mayor es la reducción de la velocidad, mayores son los cambios en las emisiones. Una reducción de la velocidad de 20 km/h ahorra casi un 5,5% de emisiones CO<sub>2</sub> por año con respecto al escenario de referencia. No obstante, la reducción de la velocidad conlleva un aumento de la duración del viaje. El traslado de los flujos de tráfico pesado a las autopistas de peaje genera ahorros inferiores al 1%. Sin embargo, trasladar los flujos de tráfico pesado a las autopistas de peaje con una reducción de la velocidad en el caso de los vehículos ligeros genera ahorros de emisiones de casi el 4%. Se debe advertir que el escenario más eficiente energéticamente es el S HDV+SPEED, si bien las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible son menores que en el supuesto S SPEED ↓ 2. Esto se explica porque se supone que los vehículos pesados solo utilizan combustible diésel, que es más eficiente energéticamente que la gasolina.

teniendo en cuenta tres tipos distintos de gestión: gestión de los flujos del tráfico y de la velocidad. Se calcula la huella de la carretera en cada escenario teniendo en cuenta el total de las dos vías alternativas y las direcciones. El siguiente paso es comparar los escenarios de la huella. El escenario de referencia se compara con las distintas propuestas de gestión con el fin de valorar las opciones de gestión con mayor eficiencia energética. La Tabla 1 explica las distintas estrategias de gestión y los escenarios.

Este programa se aplicó para analizar el caso práctico de Pajares. Hay dos carreteras paralelas alternativas que atraviesan la cordillera cántabra entre León y Asturias, en el norte de España. La primera alternativa corresponde a la carretera convencional N-630. El tramo analizado es un puerto de montaña relativamente escarpado con limitaciones estrictas de la velocidad y una longitud total de 76,8 km. La segunda alternativa es la autopista de peaje AP-66. Es una vía de mayor calidad que la N-630 porque los tramos montañosos se salvan mediante túneles y viaductos. La longitud total de la ruta estudiada es de 77,3 km. Los datos de las variables introducidas se recogen de las siguientes fuentes: la IMD y los datos sobre velocidad proceden del Mapa de tráfico de España 2009 (Ministerio de Fomento, 2009<sup>(XVII)</sup>). La división de la ruta en tramos, pendientes y longitud proceden de la prueba realizada en marzo de 2011 con un equipo registrador de a bordo.

Los resultados muestran que las estrategias de gestión de la velocidad son más efecti-



Figura 3. Situación de los puestos de peaje de San Rafael y Sanchidrián en la autopista de peaje AP-66.

## CASO PRÁCTICO 2: CONTRIBUCIÓN DEL ITS A LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PUESTOS DE PEAJE

El siguiente apartado trata de las estrategias de gestión propuestas para el caso práctico de los puestos de peaje en la autopista AP-6. Los métodos propuestos para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> en los puestos de peaje se aplican a diversos escenarios que incluyen distintas estrategias de gestión para optimizar la huella de carbono en los puestos (Hernández y otros, 2013<sup>(XVIII)</sup>). Se ha seleccionado el corredor de la AP-6 como caso práctico para probar la metodología propuesta en este estudio. Esta autopista de peaje está situada al noroeste de Madrid, España. Su longitud total es de 69,6 km divididos en tres tramos de peaje y dos tramos gratuitos. El lugar de prueba incluyó dos puestos de peaje en la autopista principal AP-6, San Rafael y Sanchidrián, situados en la autopista en los puntos kilométricos 60,5 y 102.5 respectivamente.

ABERTIS, la concesionaria de la autopista de peaje AP-6 ha facilitado los datos sobre el volumen de tráfico de ambos puestos de peaje. Las diferencias de volumen de tráfico entre ellos son importantes. San Rafael tiene una IMD de 16.043 vehículos/día, en días laborables, de los cuales el 21% son vehículos pesados y de 18.728 vehículos/día, con un 13% de vehículos pesados, en días no laborables. El volumen de tráfico en el puesto de Sanchidrián es menor: los días laborables tiene una IMD de 8.095 vehículos/día, de los cuales el 13% son vehículos pesados, y los días no laborables es de 10.209 vehículos/día, con un 5% de vehículos pesados. Se debe advertir que los vehículos pesados incluyen camiones articulados, no articulados y autobuses, mientras que los vehículos ligeros son turismos, camionetas y motos. La distribución horaria del tráfico es similar en ambos

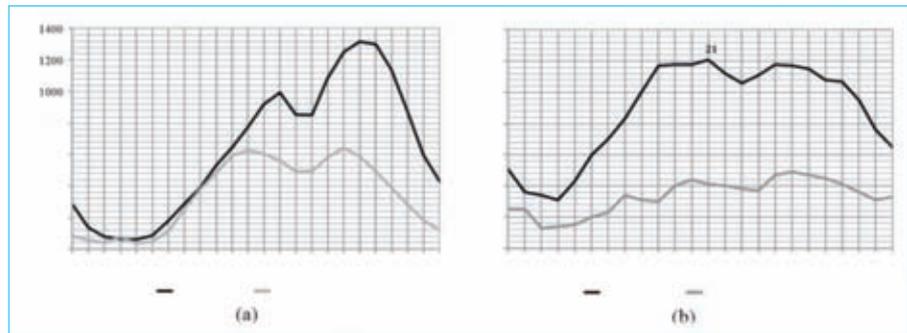


Figura 4. Distribución del tráfico por horas de (a) VL y (b) VP en ambos puestos de peaje, 2010.

puestos, con dos períodos punta en un día normal. En el caso de los vehículos ligeros, el volumen de tráfico es casi el mismo a primeras horas de la mañana. Sin embargo, a partir de las 11.00 h aumenta el tráfico en San Rafael más que en Sanchidrián, tal como muestra la Figura 4. La distribución por horas del tráfico de vehículos pesados es mayor en San Rafael, en especial al mediodía.

Los sistemas de cobro de peajes en ambos puestos incluyen carriles manuales y de pago electrónico. Los sistemas de cobro manual incluyen el pago en efectivo y con tarjeta. Como se recoge en la Tabla 2, los vehículos ligeros suelen utilizar los sistemas de peaje manual en más de un 85% de los casos los días laborables y en torno al 90% los no laborables. También los vehículos pesados se distribuyen de manera muy parecida por el sistema de cobro de peajes; no obstante, los vehículos pesados utilizan los carriles de pago electrónico (ETC) mucho más que los vehículos ligeros.

Las estrategias de gestión se basan en el diseño de escenarios. Se han propuesto dos estrategias distintas: gestión de los sistemas de cobro de peajes y gestión de colas. La estrategia de gestión de los sistemas de cobro de peajes tiene en cuenta tres tipos distintos de pago en ambos puestos de peaje. La actual situación de gestión se considera un escenario de referencia para los tres nuevos sistemas: manual, ETC y ORT (peaje free flow). La comparación con el escenario de referencia valora el aumento o reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La metodología se aplica tanto en los días laborables como los no laborables. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en toneladas por día se determinan mediante el sistema de cobro de peajes con datos anuales de la concesionaria de la AP-6 de 2010.

	Sistema de cobro de peajes	DÍAS LABORABLES			DÍAS NO LABORABLES		
		Vehículos ligeros (%)	Vehículos pesados (%)	Total	Vehículos ligeros (%)	Vehículos pesados (%)	Total
San Rafael	Manual	86	47	79	90	46	87
	ETC	14	53	21	10	54	13
	<b>Total</b>	<b>82</b>	<b>18</b>	<b>100</b>	<b>93</b>	<b>7</b>	<b>100</b>
Sanchidrián	Manual	88	49	83	91	56	88
	ETC	12	51	17	9	44	12
	<b>Total</b>	<b>87</b>	<b>13</b>	<b>100</b>	<b>95</b>	<b>5</b>	<b>100</b>

Tabla 2. Porcentaje de cobro de peajes por tipo de vehículo y día de la semana, 2010.



## Abrimos paso a nuevas ideas

¿Una carretera que descontamina el aire que respiramos?  
¿Residuos domésticos reciclados en áridos para la carretera?  
¿Pavimentos que en su fabricación ahorran energía y reducen la emisión de gases? ¿Pavimentos que absorben el ruido del tráfico? Hasta hace poco, estas ideas eran pura ficción. Actualmente ya tienen nombre: Noxer®, Tempera®, Viaphone®.....y se utilizan diariamente con éxito. Para imaginar carreteras de mañana, creemos en las nuevas ideas, incluso en las más sorprendentes, por eso innovamos.

Probisa, una empresa de Eurovía



Los resultados en el ahorro en CO<sub>2</sub> permiten comparar los escenarios propuestos.

Los resultados muestran que la aplicación de nuevas tecnologías de cobro de peajes es una estrategia eficaz de gestión. Los sistemas ORT

son especialmente efectivos y pueden suponer una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta un 70%. Esto justifica sin duda este tipo de sistema de peaje que suprime las barreras y cobra los pagos electrónicos sin alterar la velocidad de la vía. Los ahorros en las emisiones de CO<sub>2</sub> que logra la implantación de sistemas de ETC ascienden a más del 20%. Por el contrario, el mantenimiento de las cabinas convencionales de cobro es el único sistema que implica un aumento del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. De hecho, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron los días laborables casi un 6% en el puesto de peaje de San Rafael y casi un 5% en Sanchidrián. Este aumento fue menor en ambos puestos de peaje los días no laborables debido a la reducción del volumen de vehículos pesados (en torno al 3%). La Tabla 3 recoge la comparación de cada escenario respecto al de referencia.

	ESCENARIOS	DÍAS LABORABLES		DÍAS NO LABORABLES	
		EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (TM CO <sub>2</sub> /DÍA)	AHORRO ANUAL DE CO <sub>2</sub> (%)	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (TM CO <sub>2</sub> /DÍA)	AHORRO ANUAL DE CO <sub>2</sub> (%)
San Rafael	R-0	11.52		11.43	
	R-MANUAL	12.19	-5.76%	11.84	-3.56%
	R-ETC	9.01	21.87%	8.70	23.92%
	R-ORT	3.44	70.12%	3.46	69.74%
Sanchidrián	C-0	5.43		6.10	
	C-MANUAL	5.69	-4.71%	6.31	-3.31%
	C-ETC	4.19	22.81%	4.63	24.19%
	C-ORT	1.63	70.01%	1.85	69.68%

Tabla 3. Emisiones/día de CO<sub>2</sub> en las áreas de peaje de la AP-6 y ahorros anuales de CO<sub>2</sub> por supuesto.

son eficaces en cuanto al consumo energético y las emisiones, y que tienen un precio reducido. Los casos de aplicación revelan que la gestión más eficaz del flujo de tráfico consiste en reducir la velocidad de los coches en las autopistas, lo cual también se demostró en los análisis de sensibilidad, que conlleva una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de aproximadamente el 5,5%. Asimismo, resulta muy conveniente la transferencia de los flujos de vehículos pesados a autopistas alternativas de calidad, lo cual reduce en un 0,65% el consumo energético.

Por lo que respecta a la gestión de las playas de peaje, se ha demostrado que el uso de las nuevas tecnologías reduciría el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 70% y mejoraría otros factores como el tiempo de desplazamiento. La valoración de los distintos sistemas de cobro de peajes -manual, ETC y OR- ha demostrado sus ventajas tanto para ahorrar energía como para reducir la congestión.

En definitiva, las estrategias para gestionar las carreteras deben perseguir objetivos distintos, que incluyan la seguridad y una menor congestión, pero también un uso más sostenible. Este documento demuestra que todos estos objetivos no se contraponen si pensamos en estrategias integradas para toda la red de autopistas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La eficiencia energética es de interés fundamental para el sector transporte. Reduce el calentamiento global, los impactos sobre la salud y la dependencia de los combustibles fósiles. Este documento examina el potencial de aplicar distintas estrategias de gestión de las autopistas y de los sistemas del cobro de peaje al consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se propone un nuevo enfoque de gestión basado en la eficiencia energética para las autopistas españolas, capaz de evaluar diferentes medidas y estrategias en distintas situaciones. Además, se ha validado la metodología, aplicándola en dos casos prácticos. Sin embargo, el procedimiento para gestionar los flujos del tráfico desde el punto de vista de la eficiencia energética se podría aplicar en cualquier tramo de carretera de cualquier país. El estudio ha tenido en cuenta la eficiencia de los flujos promoviendo rutas alternativas que

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de una labor de investigación desarrollada por TRANSyT, financiada por el proyecto OASIS y apoyada por el programa de investigación español CENIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Deseamos dar las gracias por la información que nos han facilitado las empresas concesionarias de autopistas ABERTIS, AVASA y AUCALSA.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. IEA/OCDE. (2009). Políticas energéticas de los países integrantes de la Agencia Internacional de la Energía: Análisis de España 2009. París, Francia: Agencia Internacional de la Energía.
- II. ITF/OCDE. (2010). Transport greenhouse gas emissions: Country data. 2010. International Transport Forum.
- III. Mendiluce, M. y L. Schipper (2011). Trends in Passenger Transport and Freight Energy use in Spain. *Energy Policy*, Vol. 39, No. 10, pp. 6466-6475.
- IV. Ministerio de Fomento. Anuario Estadístico 2010, 2011. Subdirección General de Tecnologías de la Información, Administración Electrónica y Estadísticas ed. Spain.
- V. Affum, J. K., Brown, A. L. y Chan, Y. C. (2003). Integrating air pollution modelling with scenario testing in road transport planning: The TRAEMS approach. *Science of the Total Environment*, 312(1-3), 1-14.
- VI. Smit, R., Ntziachristos, L. y Boulter, P. (2010). Validation of road vehicle and traffic emission models: A review and meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 44(25), 2943-2953.
- VII. Burgess, S. C. y Choi, J. M. J. (2003). A parametric study of the energy demands of car transportation: A case study of two competing commuter routes in the UK. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 8(1), 21-36.
- VIII. Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 12(1), 33-44.
- IX. Zachariadis, T., Ntziachristos, L. y Samaras, Z. (2001). The effect of age and technological change on motor vehicle emissions. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 6(3), 221-227.
- X. Creutzig, F., McGlynn, E., Minx, J. y Edenhofer, O. (2011). Climate policies for road transport revisited (I): Evaluation of the current framework. *Energy Policy*, 39(5), 2396-2406.
- XI. Pérez-Martínez, P. J., Ming, D., Dell'Asin, G. y Monzón, A. (2011). Evaluation of the influence of toll systems on energy consumption and CO2 emissions: A case study of a Spanish highway. *Journal of King Saud University - Science*, 23(3), 301-310.
- XII. Monzón, A., Sobrino, N., Hernández, S. (2012). Energy and environmentally efficient road management: the case of the Spanish motorway network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48 ( 2012) 287 – 296
- XIII. Int Panis, L., Broekx, S. y Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the Total Environment*, 371(1-3), 270-285.
- XIV. Keller, J., Andreani-Aksoyoglu, S., Tinguely, M., Flemming, J., Heldstab, J., Keller, M. y otros (2008). The impact of reducing the maximum speed limit on motorways in Switzerland to 80 km h(-1) on emissions and peak ozone RID C-7732-2009 RID C-7730-2009 RID C-6677-2008. *Environmental Modelling & Software*, 23(3), 322-332.
- XV. Keuken, M. P., Jonkers, S., Wilmink, I. R. y Wesseling, J. (2010). Reduced NOx and PM10 emissions on urban motorways in the Netherlands by 80 km/h speed management. *Science of the Total Environment*, 408(12), 2517-2526.
- XVI. Aranda Uson, A., Valero Capilla, A., Zabalza Bribian, I., Scarpellini, S. y Llera Sastresa, E. (2011). Energy efficiency in transport and mobility from an eco-efficiency viewpoint. *Energy*, 36(4), 1916-1923.
- XVII. Ministerio de Fomento. (2009). Anuario Estadístico 2009 (Subdirección General de Tecnologías de la Información, Administración Electrónica y Estadísticas ed.)
- XVIII. Hernandez, S., Monzón, A., Sobrino, N. (2013). Decarbonization of toll plazas: impact assessment of toll collection system management. *Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies, TRB 2013 Conference Proceedings Washington, D.C.*
- XIX. Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C. y Samaras, Z. (2009). COPERT: An European road transport emission inventory model. *Information Technologies in Environmental Engineering*, 2, 491-504. 

# Nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales

Alfredo GARCÍA GARCÍA

*Catedrático, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC)*

*Universitat Politècnica de València (UPV)*

*46071, Valencia*

Francisco Javier CAMACHO TORREGROSA

*Profesor Ayudante, GIIC, UPV*

Ana María PÉREZ ZURIAGA

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor Ayudante, GIIC, UPV*

Manuel LÓPEZ PORTA

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor Asociado, GIIC, UPV*

## RESUMEN

*El proceso tradicional de diseño geométrico de carreteras se basa en la elección de una velocidad de diseño (en España, velocidad de proyecto), que se espera sea la velocidad deseada por los conductores cuando circulen por el tramo. Diversos parámetros de la vía vienen establecidos por este valor, de ahí su importancia. Sin embargo, se ha observado que los conductores no conocen y no se adecúan a esta velocidad, sino que circulan a la denominada velocidad de operación. Esto lleva en muchas ocasiones a importantes problemas de seguridad, pese a que el tramo de carretera se ajuste a la normativa. Por ello, se presenta en este artículo una propuesta de procedimiento para el diseño geométrico de carreteras que tenga en cuenta criterios operacionales y de consistencia en su concepción, con el fin de producir carreteras que se ajusten mejor a las expectativas de los conductores y, por tanto, sean más seguras.*

**Palabras clave:** *Diseño geométrico, Velocidad de diseño, Velocidad de operación, Consistencia, Seguridad vial.*

## INTRODUCCIÓN

### 1. El proceso tradicional de diseño geométrico de carreteras

El diseño geométrico constituye la parte más importante del proyecto de una carretera. A partir de unos condicionantes previos, se establece la configuración geométrica definitiva de la misma persiguiendo satisfacer al máximo

los siguientes objetivos fundamentales: funcionalidad, seguridad, comodidad, integración ambiental, armonía o estética, economía y elasticidad.

Pese a que el resultado final presenta un aspecto tridimensional, su desarrollo no suele ejecutarse directamente así. Por ello, el proceso de desarrollo tradicional consiste en el diseño iterativo de un modelo tridimensional en el que se tratan por separado cada una de sus partes

o proyecciones pero, a su vez, se evalúa en cada paso su impacto sobre el conjunto completo, analizando el cumplimiento de la normativa y la totalidad de criterios u objetivos.

Es necesario tener en cuenta, además, que no todos los objetivos del diseño están en correspondencia, siendo algunos de ellos incluso contrapuestos. Esta imposibilidad de satisfacer la totalidad de los objetivos al mismo tiempo lleva a la necesidad de priorizar unos frente a otros. Además, el objetivo de seguridad vial tradicionalmente se ha limitado al mero cumplimiento de la normativa.



Foto 1. Alineación horizontal en curvas precedidas por tangentes.

Existen numerosos factores o condicionantes del diseño, lo que hace necesaria su clasificación en externos (o previamente existentes) e internos (propios de la vía y su diseño). Entre los factores externos podría destacarse la orografía, geología y geotecnia, la demanda de tráfico, condicionantes urbanísticos y climatología. Como factores internos pueden citarse las velocidades o los efectos operacionales de la geometría (visibilidad, etc.).

La velocidad esperada es quizás el parámetro de mayor peso en el proceso de diseño. Así pues, definir una velocidad de partida en la que poder basar el diseño de la vía se convierte en una cuestión fundamental. A esta velocidad se la conoce internacionalmente como velocidad de diseño, y como velocidad de proyecto en España. Su selección se basa principalmente en la clase o tipo de carretera y en las características orográficas y urbanísticas del entorno.

Esta velocidad de diseño es considerada como punto de partida para la definición de los controles geométricos que afectan el diseño del tramo. Así pues, los valores mínimos de visibilidad, radio en curvas, parámetro de acuerdos o sección transversal se definen a partir de dicha velocidad. El paso siguiente consiste en el diseño geométrico de la vía, respetando dichos controles y las normas de diseño.

## 2. Dimensiones de la seguridad vial

Uno de los objetivos más importantes del diseño es la seguridad vial. Gran parte del contenido de normas y recomendaciones se centra en este aspecto, por lo que también debe recibir una atención especial en el proceso de diseño. Es por ello que debe establecerse claramente cómo va a medirse el grado de seguridad que alcanza un determinado diseño. A las diferentes formas de

medir este objetivo se les denominan dimensiones de la seguridad vial, existiendo cuatro posibles dimensiones: seguridad nominal, seguridad legal, seguridad sustantiva y seguridad real.

La seguridad nominal viene dada por el grado de cumplimiento de los criterios y preceptos recogidos en las guías y normativas de diseño. En estas guías se incluye una serie de parámetros, que actúan como umbrales, definiendo lo que es válido desde el punto de vista del diseño y lo que no lo es. El valor de estos umbrales considera no sólo la seguridad, sino también otros objetivos del diseño, como la economía, la integración ambiental, etc. Por tanto, el cumplimiento de la seguridad en su dimensión nominal no implica que el diseño resultante sea seguro.

Dentro de la seguridad nominal se encuentra la denominada seguridad legal, que deja en el ámbito exclusivo del conductor la responsabilidad de la siniestralidad debida a una infraestructura con limitaciones. El cumplimiento de determinados preceptos legales no tiene por qué garantizar ningún nivel concreto de seguridad vial, ya que muchos de ellos están establecidos para limitar las repercusiones económicas.

La seguridad sustantiva, al contrario que las anteriores, está relacionada con la siniestralidad y no con la adaptación a la normativa de la solución proporcionada. Así pues, está asociada a la cantidad de accidentes y a su gravedad. Mediante la consideración de esta dimensión de la seguridad, es posible llevar a cabo una estimación del impacto que un determinado diseño viario o actuación de mejora puede tener sobre la siniestralidad, empleando diversos métodos previamente calibrados. Esta dimensión presenta un carácter continuo, en el que se podrá estimar el impacto que la alteración de un factor del diseño tiene sobre la siniestralidad. Esto se corres-

ponde con una interpretación de la seguridad más próxima a la realidad que las dimensiones nominal y legal, que tienen un carácter discreto (el diseño es o no es seguro).

La necesidad de considerar adecuadamente los efectos del diseño geométrico ha provocado que, especialmente en los últimos años, se hayan desarrollado métodos y herramientas que permiten aglutinar y poner en valor práctico todo el conocimiento obtenido de la experiencia y la investigación. De esta forma, cualquier ingeniero puede verificar sus diseños desde la dimensión de la seguridad sustantiva, es decir, cuantificable, contrastable y comparable.



Foto 2. El perfil individual de velocidad operativa se puede observar por GPS.

Finalmente, la seguridad real viene determinada por la siniestralidad que se produce en una red viaria en explotación. Su análisis debe alimentar la búsqueda de soluciones locales efectivas; pero su investigación conjunta y rigurosa mejora el conocimiento de seguridad para propiciar una seguridad sustantiva más eficiente.

La aplicación de la seguridad sustantiva, fundamentada en la seguridad real, puede permitir trascender la seguridad nominal y abordar un dominio más amplio del diseño de carreteras, que incorpore los nuevos conceptos de flexibilidad y adaptación al entorno. Es crucial seleccionar medidas adecuadas, comparar alternativas, priorizar proyectos, cuantificando y previendo el comportamiento frente a la seguridad vial de los diferentes elementos de la carretera<sup>(9)</sup>.

### 3. Conceptos de velocidad

Como se ha indicado anteriormente, la velocidad de diseño es uno de los factores fundamentales que se deben considerar en el diseño viario. Históricamente, el criterio clásico ha sido seleccionar y aplicar la velocidad de diseño, tal y como fue definida y adoptada en Estados Unidos en 1936<sup>(10)</sup>, suponiendo que todos los vehículos van a circular y mantener uniformemente esa velocidad a lo largo de la vía, basándose en la clase de carretera y en las características orográficas y urbanísticas del entorno. Su aplicación permite establecer la referencia mínima para algunos parámetros básicos del diseño, como el radio mínimo de las curvas y las distancias de visibilidad necesarias para determinadas maniobras a lo largo de la vía.

Sin embargo, en la realidad los conductores no circulan a una velocidad uniforme a lo largo de un trazado, sino que la varían en función de las condiciones existentes,

principalmente las de tipo geométrico. Es por ello que durante las dos últimas décadas en algunos países se ha reexaminado el concepto clásico, revisando los métodos para tener mejor en cuenta las disparidades manifiestas entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación, especialmente en carreteras convencionales.

Dentro del concepto de velocidad de diseño pueden distinguirse dos términos distintos: velocidad de diseño designada y velocidad de diseño inferida<sup>(11)</sup>.

La velocidad de diseño designada es aquella utilizada explícitamente por el ingeniero para el establecimiento de los valores mínimos del diseño geométrico, tales como los radios de las curvas o las distancias de visibilidad. Este concepto es el equivalente a la velocidad de proyecto definida en la Instrucción de Trazado.

La velocidad de diseño inferida se aplica únicamente a características y elementos que son determinados a partir de criterios basados en la velocidad de diseño (designada). Equivale a calcular, para un determinado elemento geométrico, la velocidad de diseño (designada) que estaría asociada al mismo, pese a que dicho elemento no sea el más restrictivo del tramo homogéneo al que pertenece. Este concepto podría considerarse equivalente a la velocidad específica definida en la Instrucción de Trazado.

Como aspecto contrapuesto a la velocidad de diseño aparece la velocidad de operación, que puede definirse como la velocidad a la que operan los conductores de vehículos ligeros en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales, esto es, siendo coartados exclusivamente por la geometría de la vía. Los conductores son desconocedores de la velocidad de diseño del tramo y por ello se desenvolverán de forma variable, en función

# Innovar está en nuestros genes

En Repsol, la innovación forma parte de nuestra esencia. Por eso, en el Centro de Tecnología Repsol, dedicamos todo nuestro esfuerzo a la investigación y desarrollo de asfaltos que hacen nuestras carreteras más seguras, eficientes y sostenibles.



**REPSOL**

*Inventemos el futuro*

Repsol Lubricantes y Especialidades, S.A.  
Más información en [repsol.com](http://repsol.com)



de la velocidad a la que consideran adecuado recorrer cada uno de los elementos que componen dicho tramo. Estas velocidades varían en función de un gran número de variables, algunas de ellas determinadas por la carretera y su entorno, mientras que otras son dependientes de aspectos sociológicos. Así pues, la velocidad de operación presenta variación tanto longitudinal (evolución a lo largo del trazado) como en cada punto (dispersión entre diferentes conductores y diferentes condiciones). Por lo tanto, no debe entenderse la velocidad de operación como un valor único, sino como una distribución de velocidades.

Suele asumirse una distribución normal para la distribución de velocidades puntuales, si bien las propiedades de dicha distribución son variables. La Figura 1 muestra en un mismo gráfico las funciones de densidad para las distribuciones de velocidad de operación típicas para recta y curva. Como puede observarse, las velocidades de operación en rectas suelen presentar un mayor valor medio y una mayor dispersión que en las curvas.

La definición anterior se ajusta al concepto de velocidad de operación, pero no establece un valor manejable para su consideración. Por ello, en la práctica, en vez de trabajar con distribuciones probabilísticas, se suele considerar la velocidad de operación como el percentil 85 de la distribución de velocidades a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de circulación libre y sin restricciones ambientales. El uso de este parámetro está ampliamente extendido en el campo de la ingeniería del tráfico y de la seguridad vial. Esto es debido a que se considera que la mayoría de los conductores son responsables y, por tanto, que puede entenderse que el conductor correspondiente al percentil 85 de la velocidad puede caracterizar un comportamiento cómodo y prudente<sup>(10)</sup>.

Durante el proceso de diseño de carreteras no se dispone de información sobre la velocidad de operación que los conductores desarrollarán, lo que hace necesaria su estimación. Para ello, se hace imprescindible el uso de modelos empíricos, estimados previamente a partir de los datos observados en tramos reales. Estos modelos deberán considerar variables geométricas y/o de otro tipo. En función de las variables seleccionadas y del tipo de elemento geométrico considerado, el modelo presentará una mayor o menor precisión.

En España ya se disponen de estas herramientas complementarias al diseño geométrico, que permiten estimar las consecuencias operacionales de un determinado tra-

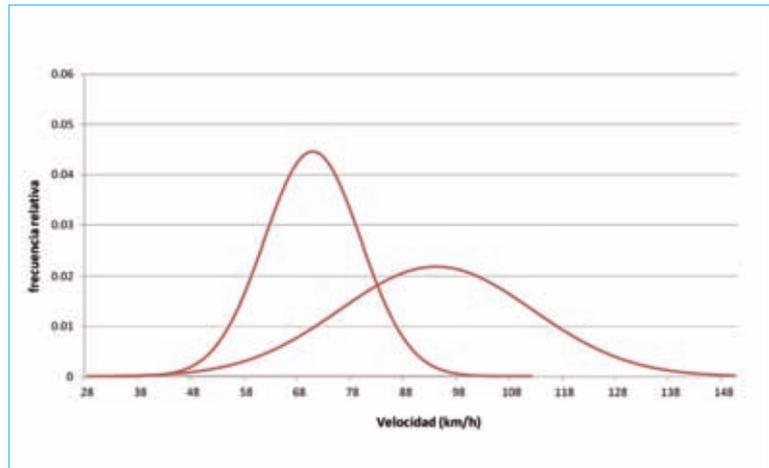


Figura 1. Funciones de densidad de la distribución de velocidades en recta y en curva.

zado, a través del desarrollo, mediante modelos y reglas de construcción, del perfil de velocidades de operación correspondiente.

Además de las velocidades de diseño y operación, hay otros conceptos de velocidad que deben tenerse en cuenta a la hora de evaluar la operación del tráfico en éstas. Estos conceptos son:

- Velocidad de diseño:
  - ♦ Velocidad de diseño designada, equivalente a la velocidad de proyecto.
  - ♦ Velocidad de diseño inferida, equivalente a la velocidad específica.
- Velocidad límite:
  - ♦ Límite genérico de velocidad.
  - ♦ Límite específico de velocidad.
- Velocidad recomendada.
- Distribución de la velocidad:
  - ♦ Percentil 85 de la velocidad. Velocidad de operación (V85).
  - ♦ Velocidad media.
  - ♦ Velocidad de percentil 50.
  - ♦ Percentil 15 de la velocidad.
  - ♦ Desviación estándar.

En España, el límite genérico de velocidad de cada carretera se establece básicamente según las características de su sección transversal. Sin embargo, los límites específicos de velocidad responden a otros factores, como pueden ser las características geométricas de los elementos individuales, restricciones de visibilidad, el estado del pavimento, presencia de accesos, etc. Ocurre lo mismo con las velocidades recomendadas. En otros países se recomienda que los límites de velocidad específicos se establezcan dentro de un rango de 5 mph del percentil 85 de la distribución de velocidad de los vehículos circulando en flujo libre<sup>(M)</sup>.

Es importante considerar las relaciones entre la velocidad de diseño, la velocidad de operación y los límites de velocidad en el diseño geométrico de carreteras<sup>(M)</sup>. Existen ciertos criterios de diseño que pretenden definir en qué casos las velocidades de diseño, de operación y límite son armónicas entre sí. Se considera que hay armonía de velocidades cuando la velocidad de diseño designada se encuentra dentro de un rango específico (por ejemplo,  $\pm 5$  mph) de la velocidad de operación observada, y la velocidad de operación se encuentra dentro de un rango específico (por ejemplo,  $\pm 5$  mph) de la velocidad límite. La velocidad de diseño inferida debe ser igual o mayor que la velocidad de diseño designada, mientras que la velocidad límite debe ser menor o igual que la velocidad de diseño designada.

Por otro lado, se considera que hay discordancia de velocidades cuando la velocidad de diseño es menor que la velocidad límite, menor que la velocidad de operación en diferentes puntos, o cuando se producen ambas situaciones.

La relación que se muestra en la Figura 2a entre los diferentes conceptos de velocidad puede considerarse ideal. La Figura 2a muestra una interpretación de cómo esta relación ideal se aplica mediante un diseño operacional.

Cuando el límite de velocidad es conocido durante el proceso de diseño, normalmente no siempre se designa una velocidad

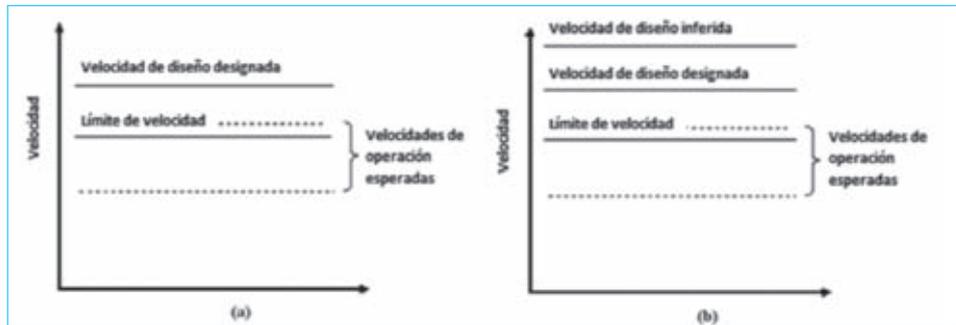


Figura 2. Relaciones de velocidad consideradas en el proceso de diseño: (a) ideal y (b) típica.

de diseño igual o superior a este límite de velocidad. Sin embargo, la relación entre la velocidad de diseño designada y la velocidad límite varía, ya que el límite de velocidad no tiene por qué ser conocido durante el proceso de diseño y, además, los límites de velocidad están sujetos a revisiones.

Mientras que la velocidad designada se determina explícitamente durante el proceso de diseño, la velocidad de diseño inferida se determina implícitamente como resultado de las decisiones tomadas para el diseño geométrico. Como se ha comentado anteriormente, las velocidades de diseño designadas e inferidas son muchas veces diferentes debido a que los ingenieros tienden a aplicar valores para los parámetros utilizados en el diseño superiores a los mínimos dados por la velocidad de diseño designada. El resultado es que muchas de las características del diseño se corresponden con criterios propios de una velocidad de diseño mucho mayor que la velocidad de diseño designada.

Así, cuando una carretera se abre al tráfico, las velocidades de operación reales pueden ser mayores que las esperadas, como se muestra en la Figura 3a. Si, además, el límite de velocidad se modifica para reflejar adecuadamente las velocidades de operación reales, la relación entre velocidad de diseño y velocidad límite se

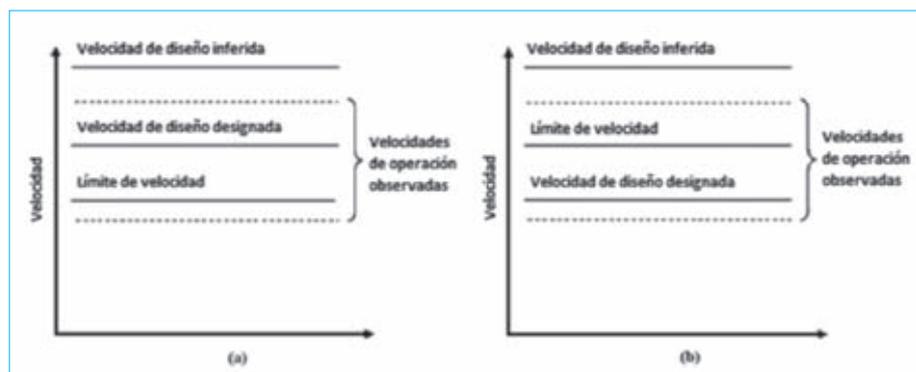


Figura 3. Relaciones de velocidad: (a) que pueden desarrollarse con velocidades de diseño bajas o moderadas y (b) que se producen cuando la velocidad límite se aumenta para adecuarse a las velocidades de operación observadas.

altera completamente. La Figura 3b ilustra el escenario resultante cuando el límite de velocidad es mayor que la velocidad de diseño designada. Estas condiciones no son deseables pero ocurren frecuentemente, poniendo en peligro la seguridad vial, ya que el aumento del límite de velocidad puede conllevar un aumento incluso mayor de las velocidades de operación.

La Figura 4 muestra la relación de velocidades de una carretera de la Comunidad Valenciana. Para evitar estos casos y alcanzar la armonía de velocidades, puede ser útil incluir métodos para la estimación de las velocidades de operación e incluir las velocidades de diseño inferidas durante el proceso de diseño.

## 4. El proceso de tramificación

En la mayoría de ocasiones, una carretera no presenta unos factores condicionantes constantes a lo largo de su traza, sino que son cambiantes, especialmente aquellos relativos a la orografía o al desarrollo urbanístico del entorno. Esto puede extrapolarse a que también debería escogerse una velocidad de diseño cambiante a lo largo de dicha traza, por lo que se hace necesario dividir la vía en tramos homogéneos. A este proceso se le conoce como tramificación. Cada tramo tendrá una velocidad de diseño única y no será inferior a una determinada longitud (se recomienda al menos 2 km). La velocidad de



Foto 3. Alineación horizontal curvilínea continua.

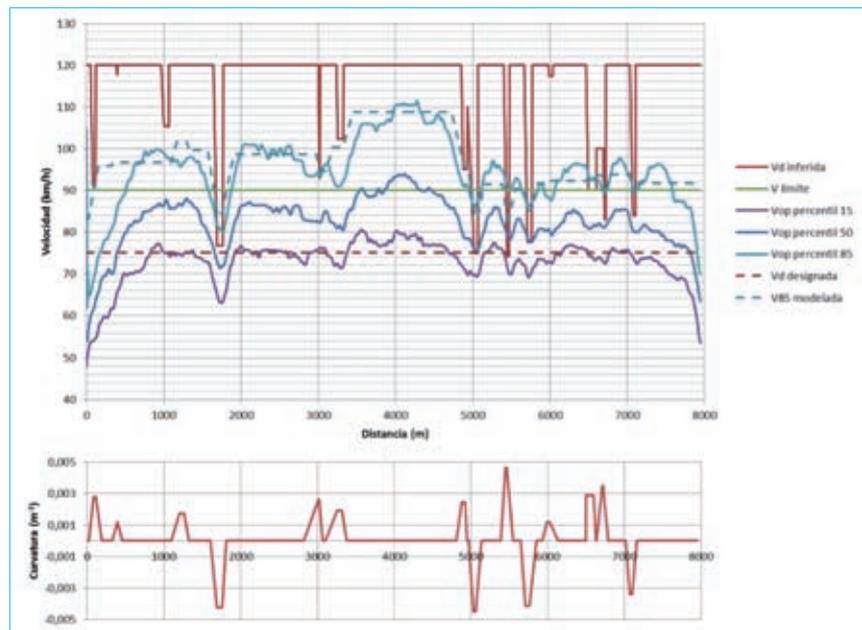


Figura 4. Ejemplo real de las relaciones de velocidad en una carretera convencional.

diseño entre tramos consecutivos también deberá estar correctamente escalonada.

La metodología más simple para llevar a cabo la tramificación de una carretera se basa en la división de la vía considerando los nudos más importantes y los cambios en la sección transversal. Estos tipos de metodologías también tienen en cuenta la intensidad de tráfico como principal variable, pero obvian otros aspectos importantes, como la geometría.

Una de las principales metodologías para la identificación de tramos homogéneos que consideran la geometría de la carretera es la denominada metodología alemana<sup>(v)</sup>. Este procedimiento está basado en la representación gráfica del valor absoluto de los ángulos de deflexión acumulados de todos los elementos geométricos en planta. Posteriormente, este perfil se divide en secciones homogéneas con pendiente aproximadamente constante, que se corresponde con sinuosidad del trazado en planta similar. Cada tramo homogéneo se caracteriza por el valor de su tasa de cambio de curvatura (CCR), definida según la ecuación 1.

$$CCR = \frac{\sum |\gamma_i|}{L} \quad (1)$$

Donde: CCR es la Tasa de Cambio de Curvatura;  $\gamma_i$  es el ángulo de deflexión de cada elemento geométrico; y L es la longitud del tramo de carretera. Esta tasa suele expresarse en gon/km. La longitud mínima recomendable del tramo de carretera es 2.000 m. La Figura 5 muestra un ejemplo de tramificación.

Esta metodología tiene en cuenta las variaciones en la geometría, pero no así el ancho de vía u otros aspectos relacionados con la operación. Algunos métodos más avanzados que sí lo consideran son los desarrollados por Cafiso et al.<sup>(vii)</sup> o por García et al.<sup>(viii)</sup>.

Por su parte, el *Highway Safety Manual*<sup>(ix)</sup> ha establecido una metodología que se divide en dos pasos. El primero de ellos divide la carretera según los nudos más importantes, para, posteriormente, analizar las variaciones de la sección transversal dentro de cada una de estas divisiones, obteniendo así los tramos homogéneos finales.

### 5. Consistencia del diseño geométrico

Una de las principales características del diseño geométrico de una carretera es su nivel de consistencia. La definición más aceptada para la consistencia en el diseño es la conformidad de las características geométricas y operacionales de la vía con las expectativas del conductor<sup>(x)</sup>.

Estas expectativas de los conductores pueden ser de dos tipos<sup>(x)</sup>: *a priori*, referidas a las expectativas que un conductor tiene asociadas a determinados tipos de carreteras por su experiencia al volante; y *ad hoc*, referidas a las expectativas que el conductor va adquiriendo conforme recorre un determinado tramo de carretera.

Al ser la relación entre el comportamiento de la vía y lo que el conductor espera de la misma, un alto grado de consistencia implica que la carretera se ajusta mucho a las expectativas del conductor, por lo que no producirá sorpresas. En cambio, una mala consistencia implica que el comportamiento de la carretera es muy diferente a dichas expectativas, generando sorpresas en el conductor y presentando, por tanto, un mayor riesgo potencial de aparición de accidentes. Es por ello que este parámetro, además, suele guardar relación con el nivel de siniestralidad.



Foto 4. Las intersecciones se deben tener en cuenta para distinguir tramos de carretera homogéneos.

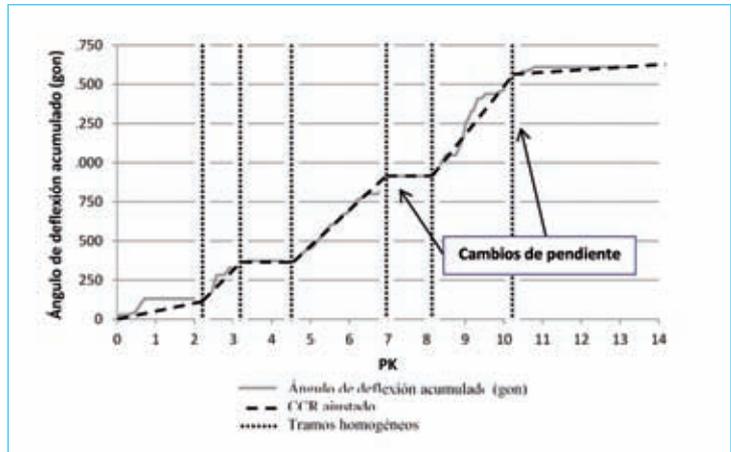


Figura 5. Ejemplo de tramificación según el método alemán.

La mayoría de las investigaciones relacionadas con la consistencia y sus modelos desarrollados se centran en cuatro ámbitos principalmente: la velocidad de operación y sus variaciones, la estabilidad del vehículo, los índices de trazado y la carga de trabajo del conductor. Entre ellos, los criterios más extendidos están basados en el análisis de la velocidad de operación<sup>(xi)</sup>. Esta velocidad se emplea para evaluar la consistencia, bien examinando su variación a lo largo de la vía o bien comparándola con la velocidad de diseño. Hasta el momento sólo son de aplicación en carreteras convencionales de una única calzada, que es donde se producen mayores oscilaciones de la velocidad a lo largo de su recorrido y, por tanto, hay más probabilidades de que haya un desajuste entre las velocidades que permite el trazado y las que esperan desarrollar los conductores.

Los métodos de evaluación de la consistencia más extendidos son los desarrollados por Lamm et al.<sup>(xii)</sup>. Establecieron dos criterios relacionados con la velocidad de operación, que incluían la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño (Criterio I) y la diferencia de velocidad de operación entre elementos geométricos consecutivos (Criterio II). La Tabla 1 presenta un resumen de los umbrales de consistencia para los criterios I y II.

La mayoría de criterios de consistencia ofrecen un resultado discreto, no continuo, en función de umbrales. El motivo de ello es el de indicar

RANGO DE CONSISTENCIA	CRITERIO I (km/h)	CRITERIO II (km/h)
Buena	$ V_{85} - V_d  \leq 10$	$ V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 10$
Aceptable	$10 <  V_{85} - V_d  \leq 20$	$10 <  V_{85i} - V_{85i+1}  \leq 20$
Pobre	$ V_{85} - V_d  > 20$	$ V_{85i} - V_{85i+1}  > 20$

Tabla 1. Umbrales para la determinación de la consistencia del diseño. Criterios I y II de Lamm et al.

claramente cuándo debe actuarse sobre la vía y cuándo no. Sin embargo, la realidad se comporta de forma continua. Es por ello que otros investigadores sugieren emplear funciones continuas para determinar el grado de consistencia<sup>(xiii)</sup>. Este es el caso de los trabajos realizados por Polus y Mattar-Habib<sup>(xiv)</sup> y Camacho-Torregrosa et al.<sup>(xv)</sup>. En ambas aproximaciones se considera de forma completa el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera, reflejando en cierta medida su dispersión. Se entiende que la dispersión en la velocidad de operación está ligada con los cambios en la carga cognitiva del trazado geométrico y por lo tanto, un elevado número de cambios está asociado con una mayor siniestralidad.

Un modelo reciente, desarrollado por García et al.<sup>(xvi)</sup>, se basa en la hipótesis de que el comportamiento de la carretera en un punto puede estimarse por medio de la velocidad de operación en ese punto, mientras que las expectativas de los conductores se pueden estimar por la velocidad de operación inercial, representada por la media móvil de la velocidad de operación durante los 1.000 metros anteriores. La diferencia entre ambos parámetros se ha denominado Índice de Consistencia Inercial (ICI). Los umbrales propuestos de consistencia son los mismos de los criterios I y II.

## 6. Aplicación de la consistencia en el diseño geométrico

Un trazado seguro debe ofrecer una lectura e interpretación sencillas, que inviten a recorrerlo gradualmente, a los niveles de velocidad para los que se diseñó cada uno de sus elementos. Esto no quiere decir que los conductores deban conocer dichas velocidades de referencia, sino que puedan estimarlas y asimilarlas implícitamente.

Para ello, hay que lograr un diseño geométrico consistente, fácilmente legible por los conductores, contribuyendo así a minimizar las violaciones de sus expectativas. Se persigue de este modo que éstos perciban el trazado de forma homogénea, sin variaciones bruscas en el nivel de atención.

La evaluación de la consistencia mediante los criterios descritos permite confirmar, en la fase de diseño de la

carretera, si el trazado de la misma puede considerarse de consistencia buena, aceptable o pobre, e incluso estimar el número de accidentes que puede llegar a producirse. En el caso de que el diseño de un trazado

de carretera sea evaluado como pobre o aceptable, deberá replantearse la optimización del diseño. Por otra parte, en carreteras en servicio, la evaluación de su consistencia permite identificar qué zonas son más problemáticas, y así centrar en las mismas el rediseño.

## 7. El diseño geométrico en las fases de planeamiento y proyecto

Las fases de planeamiento y de diseño deben abordarse de forma distinta, ya que así lo son los objetivos que se persiguen. Si bien en la primera se busca definir a grandes rasgos una serie de posibles soluciones viarias, decantándose por la más adecuada, en la segunda de ellas se pretende obtener el diseño final y su impacto en los conductores.

En la fase de planeamiento se definen diferentes soluciones tentativas, de las cuales deberán determinarse características globales, destacando sus velocidades de planeamiento, así como los tramos en los que pueden dividirse y sus correspondientes velocidades de diseño. Se persigue un correcto escalonamiento de las diferentes velocidades de diseño y una correcta consistencia de la solución con el entorno (a nivel de red de carretera).

En la fase de proyecto ya se dispone de una correcta tramificación y de unas velocidades de diseño adecuadas. Es en este punto donde deben determinarse las restricciones geométricas a aplicar y proceder a la definición geométrica de la carretera.

## LIMITACIONES DEL PROCESO DE DISEÑO GEOMÉTRICO ACTUAL

El actual proceso de diseño geométrico presenta ciertas carencias, derivadas principalmente de cómo se consideran las diferentes velocidades en el proceso de diseño. Tal y como ha sido descrito, el hecho de que la carretera se ajuste a los criterios marcados por las normas o guías de diseño no necesariamente garantiza que sea segura.

La velocidad de diseño impone un mínimo estricto en ciertas condiciones de diseño dentro de un tramo, como



## FABRICANTE Y DISTRIBUIDOR DE EQUIPOS PARA INGENIERÍA CIVIL

### ARRB



- SOLUCIONES INTEGRALES PARA PAVIMENTOS: PERFIL LONGITUDINAL, TRANSVERSAL, MACROTEXTURA, RUGOSIDAD (IRI), ETC.

### ASFT



- LIDER MUNDIAL
- MEDIDA CONTINUA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN CARRETERAS
- CORRELACIÓN CON EL PÉNDULO BRITÁNICO Y CON EL SCRIM EN TRES VELOCIDADES: 30-60-90 KM/H

### TRIAxIAL AUTOMÁTICO

- PARA SUELOS, ELECTRÓNICO CON 4 SISTEMAS DE PRESIÓN Y CON PRENSA



### EDÓMETRO

- ADQUISICIÓN DE DATOS



### CORTE DIRECTO

- ADQUISICIÓN DE DATOS



### ANALIZADOR

- ANALIZADOR ASFÁLTICO INFRA TEST EN 26971-1



### PRENSA

- PRENSA AUTOMÁTICA MULTIENSAYO C.B.R. / MARSHALL / DURIEZ / ETC.



### COMPACTADORAS

- COMPACTADOR SUELOS PN - PM .CBR EN 103500 EN 103501 EN 103502



- COMPACTADORA MARSHALL EN 12697-30 EN 12697-10



### PRENSAS

- PRENSA DINÁMICA COOPER EN 12697-24 EN 12697-25



### PÉNDULO

- EN 1097-8/00 EN 1342 EN 13036-4 EN 1436



Mecánica Científica S.A. Fabricante de equipos para ensayos de:

- ARIDOS • SUELOS • CEMENTOS • AUSCULTACION DE FIRMES / VIAS • ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
- ROCAS • HORMIGONES • LIGANTES • MEZCLAS BITUMINOSAS

**¡LIDER EN CALIDAD!**



el radio mínimo o las distintas visibilidades necesarias. Sin embargo, en la mayor parte del tramo homogéneo las condiciones geométricas serán más suaves que éstas, por lo que la velocidad de operación tenderá a ser superior a la de diseño. Ello puede redundar en problemas de seguridad, especialmente referentes a la visibilidad disponible respecto de la necesaria.

Por otra parte, pese a que el conocimiento sobre las características operacionales de los conductores y su relación con la seguridad ha aumentado significativamente en los últimos años, estas evaluaciones no han sido incorporadas al proceso de diseño. Por ello, en muchas ocasiones el producto final presenta disparidades importantes en las velocidades, redundando finalmente en una mayor siniestralidad.

En cuanto a la fase de planeamiento, actualmente se considera gran diversidad de parámetros en el análisis de soluciones, como la economía, impacto ambiental, capacidad y operación, longitud, etc. Sin embargo, la seguridad vial raramente es uno de dichos aspectos. Es por ello que debería incorporarse de una manera más directa, a ser posible, mediante un análisis de la consistencia de las alternativas propuestas y la estimación de su impacto sobre el número de accidentes futuro, es decir, mediante la seguridad sustantiva.

Hasta ahora, sólo algunos países han incorporado en su normativa o guías de diseño geométrico la consideración de la consistencia, pero no se ha llegado a formular un proceso global y coherente para su integración.

**OBJETIVOS**

El objetivo de este artículo es, considerando los aspectos descritos en el apartado anterior, proponer un nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales. En este nuevo proceso se pretende incorporar, como paso intermedio fundamental, el análisis de la seguridad vial de la carretera en diseño. Este análisis será principalmente desarrollado a partir de la consideración de los aspectos operacionales y de seguridad vial que se han expuesto. Asimismo, dichos procesos serán de tipo iterativo, con el objetivo de pro-

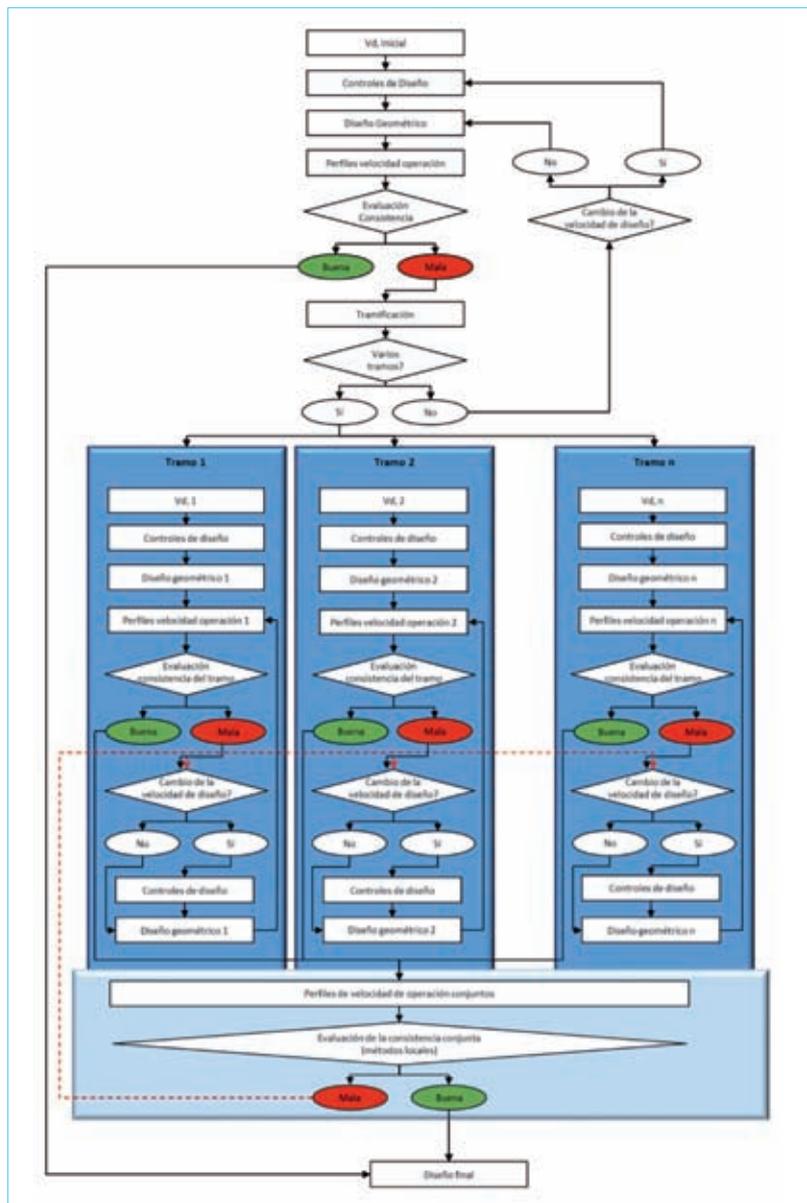


Figura 6. Nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales.

poner soluciones que converjan a un diseño consistente y, por ende, seguro.

**PROPUESTA DE NUEVO PROCESO DE DISEÑO GEOMÉTRICO SEGURO DE CARRETERAS CONVENCIONALES**

A continuación, se presenta un nuevo proceso de diseño geométrico de carreteras convencionales que sí considera criterios operacionales. En esta nueva propuesta de diseño se tienen en cuenta los criterios normativos, pero, al mismo tiempo, se evalúan diversos aspectos operacionales y de seguridad, encaminados a ofrecer una solución mucho más optimizada y segura.

En cada fase no se describen con detalle las herramientas a utilizar, sino únicamente el objetivo perseguido. Se deja, pues, libertad al diseñador en este aspecto. El motivo, entre otros, es que las herramientas existentes evolucionan a medida que el conocimiento en el campo aumenta.

## 1. Proceso general

Básicamente, el proceso de diseño que se plantea pretende incorporar la evaluación de la seguridad en el proceso de diseño por medio de ajustar dicho diseño al comportamiento de los conductores. La Figura 6 muestra el diagrama de flujo del proceso de diseño planteado para carreteras de nueva creación.

En este nuevo proceso de diseño se comienza por elegir la velocidad objetivo anticipada, que supone la base de la velocidad de diseño. Esta velocidad objetivo debe estar basada en las expectativas que los conductores pueden tener según la funcionalidad de la vía dentro de la red de carreteras, la orografía y el desarrollo urbanístico, entre otros factores.

La velocidad de diseño inicial es la base para el cálculo de la mayor parte de los controles geométricos, destacando las visibilidades, trazado en planta, alzado y sección transversal. De esta forma, se obtiene un diseño geométrico inicial. El paso siguiente consiste en determinar si este diseño es seguro o necesita alteraciones.

Dentro de esta comprobación, el primer paso es estimar los perfiles de velocidad de operación (tanto en el sentido de ida como en el de vuelta), mediante los modelos correspondientes. En España ya existen modelos y reglas de construcción a este respecto, como los desarrollados por Pérez et al.<sup>(xvii, xviii)</sup>.

El paso siguiente consiste en la determinación del nivel de consistencia del tramo a partir de sus perfiles de velocidad de operación. Se recomienda la aplicación de, al menos, los siguientes criterios:

- Modelos que consideren el diferencial entre la velocidad de operación y la de diseño. Un ejemplo sería el Criterio I de Lamm et al.
- Modelos locales que evalúen la dispersión de la velocidad de operación entre elementos consecutivos, como puede ser el Criterio II de Lamm et al.
- Modelos inerciales, que pueden considerarse como un término medio entre los dos anteriores. Un ejemplo sería el ICI de García et al. Permitirían encontrar diferenciales importantes entre la velocidad de operación y las

expectativas de los conductores que no hubieran sido detectadas por los anteriores modelos.

- Modelos globales, que consideran la variabilidad de la velocidad de operación dentro de un tramo homogéneo de carretera. En este caso no se ha definido tramo homogéneo, por lo que se aplicaría sobre la totalidad.

Únicamente en el caso de que todos los modelos arrojasen un buen valor de la consistencia, podría validarse el diseño como bueno. En cualquier otra circunstancia, se debería proceder de forma iterativa a mejorar la solución propuesta. En este último supuesto, el primer paso consiste en determinar si debe plantearse la división del conjunto en tramos homogéneos, por la variación de los factores externos o la sinuosidad del trazado en planta. Para ello, puede emplearse una gran diversidad de criterios de tramificación.

Una posibilidad es que el proceso de tramificación arroje un único tramo (el conjunto). En este caso el diseñador deberá plantearse si la falta de consistencia puede ser debida a una mala selección inicial de la velocidad de diseño o simplemente se debe a un mal diseño geométrico. En el primero de los casos deberá redefinir dicha velocidad, mientras que en el segundo caso habrá de proceder a mejorar el diseño.

En caso de que la vía se componga de varios tramos, deberá definirse una velocidad de diseño para cada uno de ellos, y proceder posteriormente a un diseño geométrico tentativo de cada uno. Es importante recordar que no pueden establecerse saltos muy significativos de velocidad de diseño entre tramos consecutivos (no más de 20 km/h).

Para cada uno de los tramos deberá desarrollarse el perfil de velocidad de operación correspondiente y evaluarse la consistencia considerando criterios locales y globales. Si no se obtiene una consistencia buena, el diseñador deberá plantearse la posibilidad de cambiar la velocidad de diseño y/o el propio diseño geométrico.

Solo en el momento en que todos los tramos presenten una consistencia buena, se procederá a determinar los perfiles de velocidad de operación para todo el conjunto y aplicar criterios de consistencia locales. En principio, la consistencia general de la carretera debería ser buena. En caso contrario, y en función de qué tipo de inconsistencia se produzca, el diseñador deberá volver al paso anterior y modificar los tramos correspondientes, iniciando de nuevo el proceso y reconsiderando las velocidades de diseño de los mismos. La Figura 6 muestra de forma esquemática el proceso.

En fase de explotación deben tomarse mediciones de velocidad de operación y de distancias de visibilidad disponibles, que permitan definir un perfil de cada una de estas variables a lo largo de la carretera. Tomando como base los perfiles de velocidad de operación real de la vía y los perfiles de distancias de visibilidad disponibles, se debe proceder al establecimiento de los límites de velocidad. De esta forma, se alcanzará el concepto de armonía de velocidades al que se ha hecho referencia en el apartado de introducción, dando como resultado un diseño de la carretera más seguro del que se obtiene en la actualidad a partir de la simple comprobación geométrica del trazado con base en las normas.

## 2. Adaptación a la fase de planeamiento

La adaptación de la metodología propuesta para la fase de planeamiento persigue fundamentalmente identificar qué posibles alternativas de las planteadas son más seguras, por medio de la consistencia. Puesto que no se obtendrá un diseño detallado, el esquema del proceso es sensiblemente más sencillo que para el caso de un proyecto de nueva construcción.

El primer paso de esta fase comienza desarrollando un conjunto de diversas alternativas, con bajo grado de definición, que cumplan la función perseguida para la nueva carretera. Se procederá a un prediseño de cada una de ellas, atendiendo a una primera tentativa de velocidad de diseño. A partir del mismo, se evaluará la consistencia de cada solución, empleando exclusivamente criterios globales. Las alternativas con un buen grado de consistencia podrán definirse como definitivas, mientras que las que presenten una consistencia mala deberán ser tramificadas, siguiendo el proceso establecido para cada uno de sus segmentos diferenciados.

Gracias al análisis de la consistencia global, pueden estimarse los accidentes con víctimas para cada una de las alternativas. Se dispone así de una medición más directa de las repercusiones sobre la seguridad en cada una de las alternativas. Este criterio, por tanto, se convierte en una medición objetiva (seguridad sustantiva) que puede ser igualmente considerado en el proceso de elección de la alternativa final, junto con el resto de criterios que hasta ahora se consideran.

## APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE CARRETERAS EN SERVICIO

Las carreteras en servicio actuales fueron concebidas mediante el proceso tradicional de diseño geométrico.

Como consecuencia, los parámetros tales como los acuerdos y la visibilidad son dependientes de la velocidad de diseño, la cual, en muchas ocasiones, puede estar muy lejos de la que realmente es utilizada por los conductores. Además, en carreteras más antiguas no se tuvo en cuenta la proporción máxima de radios entre curvas consecutivas.

Por otra parte, en muchas ocasiones también se concibe una carretera como un ente único, sin una clara división en tramos con diferentes velocidades de diseño. Ello puede generar problemas de adaptación e inconsistencias, que, generalmente, producen una mayor siniestralidad.

La innovación metodológica planteada puede ser utilizada para determinar hasta qué punto estos problemas pueden afectar el desempeño en seguridad de una carretera actualmente construida. De este modo, se podría determinar si presenta potencialmente un problema en seguridad y, en su caso, identificar ese problema para valorar la posibilidad de subsanarlo.

Fundamentalmente, la evaluación en seguridad de una carretera existente se basa en el análisis de su consistencia, tanto global como local. En primer lugar, se debería restituir la geometría de la misma. A partir de ello, se determinarían los perfiles de velocidad de operación, utilizándolos para el análisis de la consistencia y la tramificación.

Los análisis de consistencia que consideran la velocidad de diseño (criterio I) podrían identificar si la operación de los vehículos se adecúa poco a las prestaciones mínimas de la carretera o al propio entorno. En este caso, habría que determinar la velocidad de diseño inferida. Criterios como el II (Lamm et al., 1999) o el inercial (García et al., 2013) identificarían fallos en el diseño de la misma, mientras que un análisis de consistencia global para cada tramo determinaría la coherencia entre los mismos, así como permitiría estimar, en cierta medida, la siniestralidad esperada.

## 1. Adaptación al rediseño de carreteras

La metodología presentada permite su adaptación para el rediseño de carreteras, aunque con ligeras variaciones. Generalmente, el rediseño de una carretera viene motivado por la detección de un número de accidentes de tráfico superior al que cabría esperar, lo que en principio sugiere una implicación por parte del factor infraestructura.

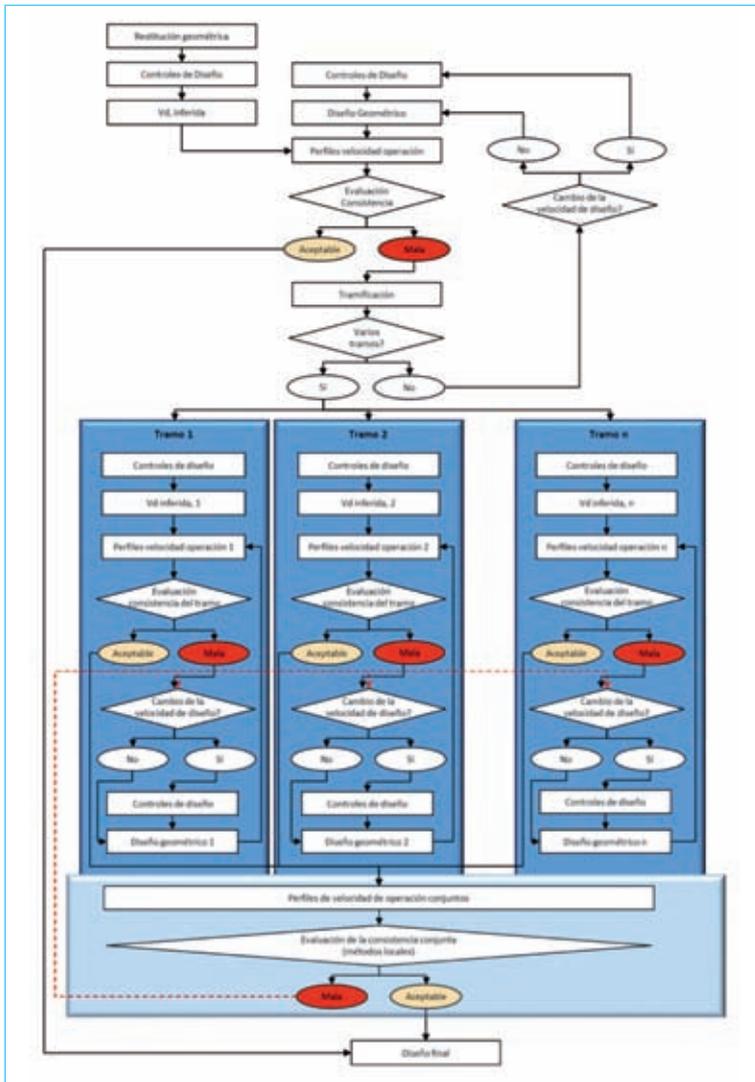


Figura 7. Proceso de rediseño de carretera existente.

La primera gran diferencia es que no se parte de una velocidad de diseño, sino que ésta se infiere a partir de su geometría. Así pues, el primer paso a realizar consiste en determinar las características geométricas de la carretera a rediseñar (7). Estas características pueden obtenerse, o bien a partir del proyecto correspondiente o a través de una restitución geométrica. A partir de las mismas se determinan los controles geométricos más restrictivos y la velocidad de diseño inferida.

El siguiente paso consiste en determinar si el tramo, en estas condiciones, presenta una adecuada consistencia, y, para ello, el proceso es similar al caso de un nuevo proyecto. En primer lugar, se estimarán los perfiles de velocidad de operación para cada sentido y, posteriormente, se determinará la consistencia, que arrojará presumiblemente un valor malo. Así pues, se procederá a su tramificación. En el caso de que la carre-

tera esté conformada exclusivamente por un tramo, ya sí se procederá a replantearse, en primer lugar, su velocidad de diseño (esta vez, velocidad de diseño designada), y se rediseñará hasta alcanzar valores adecuados de consistencia.

En caso de que la carretera esté conformada por diversos tramos, se realizará un procedimiento similar para cada uno de ellos. Así, en primer lugar se identificarán los controles geométricos limitantes, para inferir la velocidad de diseño. Se analizará la consistencia de cada tramo, con el fin de determinar si la velocidad de diseño inferida es adecuada o cabe la posibilidad de replantearla. En el momento en que todos los tramos arrojen un valor de consistencia aceptable, se podrá avanzar al siguiente paso (análisis conjunto), en el que nuevamente se aplicarán criterios locales para determinar las posibles inconsistencias.

## Discusión

El diseño geométrico es la fase más importante dentro de la definición de una carretera, ya que en él se establece la configuración final del trazado de la vía, que debe satisfacer los objetivos fundamentales, considerando los condicionantes existentes.

Se ha indicado anteriormente que la velocidad de diseño debería estar fundamentada en el tipo de carretera y en los factores externos condicionantes (orografía, entorno urbanístico, etc.). Esta elección debe ser tomada por el diseñador, para lo que se recomienda definir unas tablas que ayuden en dicho proceso. Se recomienda que estas tablas actúen como una guía, pero dejando la libertad última al diseñador para tomar la decisión.

La elección de los modelos de velocidad de operación también se deja abierta. Existe un gran número de modelos que presentan múltiples diferencias, si bien por lo general son muy variables geográficamente, por lo que se recomienda el empleo de modelos locales, en caso de existir. En el caso de España, ya se dispone de modelos calibrados y de reglas de construcción.

En cuanto a los modelos de consistencia, los globales tienen la ventaja de que permiten estimar el número de accidentes, si bien no localizan los puntos más

conflictivos. En cualquier caso, su aplicación debe centrarse sobre tramos homogéneos, ya que, de lo contrario, podría sesgarse el resultado.

En cuanto al rediseño de carreteras existentes con problemas de siniestralidad, el objetivo es convertir la geometría actual en un diseño geométrico seguro a través de los mínimos cambios posibles, por lo que se dispone de una menor flexibilidad que para nuevas carreteras. Es por ello que, en ocasiones, y cuando se parte de carreteras con mala consistencia inicial, puede resultar prácticamente imposible producir un diseño de consistencia buena a un coste razonable (la consistencia buena requeriría un cambio drástico en el trazado). Por ello, en estos casos se pueden permitir los diseños con nivel de consistencia aceptable.

Tanto el esquema de diseño tradicional como el propuesto finalizan con el establecimiento de los límites de velocidad. Estos se establecen en función de las distancias de visibilidad disponibles y de la velocidad de operación, ambos parámetros medidos una vez construida la carretera. Gracias a los modelos de estimación de la velocidad de operación, es posible estimar dichos perfiles con un relativo grado de fiabilidad, por lo que será más probable alcanzar la armonía de velocidades que si se considera el diseño tradicional.

En él, la velocidad de operación puede ser considerablemente más alta que los límites de velocidad establecidos (condicionados por la visibilidad disponible) y que la velocidad de diseño designada, con la que se calculó durante el diseño la distancia de visibilidad necesaria en cada punto del trazado.

En el caso de estar en la fase de planeamiento, en el proceso de selección de alternativas, esta metodología no sólo permite identificar qué diseños son viables desde el punto de vista de la seguridad vial, sino que los modelos de consistencia global posibilitan estimar el número de accidentes con víctimas. Ello, pues, se convierte en un criterio objetivo que puede ser utilizado en la priorización de alternativas, junto con otros tales como la integración ambiental, la economía, etc. Por otra parte, también hay criterios locales de consistencia sin relación explícita con el nivel de siniestralidad que sí han sido tenidos en cuenta en el proceso de diseño. Cabría analizar hasta qué punto resulta conveniente introducir los resultados en el pro-



Foto 5. Las carreteras rurales de montaña requieren modelos específicos de velocidad operativa.

ceso de elección de alternativas y, en caso afirmativo, la manera de hacerlo.

Por último, cabe indicar que la metodología propuesta es aplicable a todo tipo de carreteras, si bien la inmensa mayoría de modelos de velocidad de operación, tramificación y consistencia fueron calibrados, hasta ahora, para carreteras convencionales. En el futuro, esta metodología podría extenderse a otro tipo de vías.

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se presenta un nuevo proceso de diseño geométrico de carreteras convencionales que permite incorporar el análisis operacional para obtener unas infraestructuras viarias más seguras. Mientras que con el proceso tradicional de diseño se consigue garantizar la seguridad nominal de la vía, basada únicamente en los criterios y preceptos recogidos en las guías y normativas; el nuevo proceso verifica el diseño desde la dimensión de la seguridad sustantiva, es decir, cuantificable, contrastable y comparable, estimando el número de accidentes que pueden producirse, así como su gravedad. Por ello, esta visión se aproxima más a la garantía de la seguridad real en la carretera.

A lo largo del artículo se recogen las tipologías de las diferentes herramientas que se deben considerar, no recomendando ninguna en particular, puesto que son muy variables en función de la región geográfica, así como del conocimiento de la relación siniestralidad-diseño geométrico. Se citan tres tipos de herramientas: los modelos de velocidad de operación, la tramificación y los modelos de consistencia.

Finalmente, se ha particularizado el diagrama de flujo para el caso de nuevo diseño, fase de planeamiento y rediseño de carretera existente. Pese a que el esquema de trabajo es similar en todos los casos, existen pequeñas variaciones.

Por otra parte, también se indica cómo puede utilizarse el presente procedimiento para la evaluación del nivel de seguridad de carreteras existentes, identificando así en mejor medida en qué casos cabría llevar a cabo un rediseño y dónde focalizarlo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. García, A. (2006). Velocidad de proyecto vs. velocidad del proyecto. *Rutas: revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, No. 117, pág. 3.
- II. Barnett, J. (1936). Safe Side Friction Factors and Superelevation Design. Highway Research Board, Proc., No. 16, pp. 69-80.
- III. Donnell, E.T., Hines, S.C., Mahoney, K.M., Porter, R.J. y McGee, H. (2009). Speed concepts: informational guide. Report No. FHWA-SA-10-001.
- IV. Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2009.
- V. Donnell, E.T., Hines, S.C., Mahoney, K.M. y Porter, R.J. (2009). Understanding speed concepts. Key definitions and case study examples. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2120, pp. 3-11.
- VI. Forschungsgesellschaft für Strassen y Verkehrswesen Linienführung. RAS-L Richtlinien für die Anlage von Strassen; Bonn, Alemania, 1995.
- VII. Cafiso, S., Di Graziano, A., Di Silvestro, G., y La Cava, G. (2008). Safety performance indicators for local rural roads: Comprehensive procedure from low-cost data survey to accident prediction model. *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, Washington D. C.
- VIII. García, A.; Llopis-Castelló, D.; Pérez-Zuriaga, A.M. y Camacho-Torregrosa, F.J. (2013). Homogeneous Road Segment Identification based on Inertial Operating Speed. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, Washington D. C.
- IX. AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. Highway Safety Manual. Washington, D.C., 2010.
- X. Wooldridge y otros (2003). Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways. NCHRP Report 502. TRB.
- XI. Gibreel, G.M. y otros (1999). State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, No. 125(4), pp. 305-313.
- XII. Lamm, R., Psarianos, B. y Mailaender, T. Highway design and traffic safety engineering handbook. McGraw-Hill Companies, Inc., 1999.
- XIII. Hassan, Y. (2004). Highway Design Consistency: Refining the State of Knowledge and Practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1881, pp. 63-71.
- XIV. Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety. *Journal of Transportation Engineering*, No. 130(3), pp.286-293.
- XV. Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J.M, y García García, A. (2013). New Geometric Design Consistency Model Based on Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation. *Accidentes, Análisis y Prevención*. Aceptado DOI: 10.1016/j.aap.2012.10.001.
- XVI. García, A., Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F.J. y Pérez-Zuriaga, A.M. (2013). New Consistency Index Based on Inertial Operating Speed. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (aceptado, pendiente de publicación).
- XVII. Pérez-Zuriaga, A.M.; García, A.; Camacho-Torregrosa, F.J. y D'Attoma, P. (2010). Modeling Operating Speed and Deceleration on Two-Lane Rural Roads with Global Positioning System Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2171, pp. 11-20.
- XVIII. Pérez-Zuriaga, A.M.; Camacho-Torregrosa, F.J. y García, A. (2013). Study of Tangent-to-Curve Transition on Two-Lane Rural Roads Based on Continuous Speed Profiles. *Journal of Transportation Engineering* (Aceptado, pendiente de publicación). 



# La conservación de las carreteras en tiempos de recesión económica

Miguel A. DEL VAL

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Catedrático - Universidad Politécnica de Madrid

## RESUMEN

*Se plantea en el artículo la importancia que tiene la conservación de las carreteras, más aún si cabe en tiempos de recesión económica. Como consecuencia de los ajustes presupuestarios, los fondos para la conservación se restringen, pero se destaca que no se trata sólo de disponer de fondos suficientes. Es preciso contar con otros elementos igual de importantes o incluso más: una política explícita de conservación, una estructura adecuada en las administraciones titulares de las redes viarias, medios materiales y, sobre todo, medios humanos competentes y experimentados, y una tecnología adaptada a las necesidades. En relación con este último aspecto, se subraya la importancia que tienen las técnicas de actuación preventiva.*

**Palabras clave:** Carretera, Conservación, Economía, Inversión, Prevención.

## INTRODUCCIÓN: **ES MEJOR PREVENIR QUE CURAR**

La crisis financiera de 2007 en los Estados Unidos de América fue el desencadenante de una crisis económica global que ha sacudido especialmente a los países del sur de la Unión Europea (UE): Grecia, Chipre, Italia, España y Portugal, todos ellos pertenecientes a la zona euro (la moneda común europea). En estos países la crisis financiera global se ha unido a una crisis local debida a graves problemas estructurales propios, destacadamente en el sector bancario y en el inmobiliario, y a los desequilibrios en el interior de dicha zona euro (como consecuencia, entre otras razones, de la inexistencia de una política fiscal común). Se ha producido además en ellos un aumento imparable de la deuda pública, tanto en términos absolutos como expresada en porcentaje del Producto Interior Bruto: 169% en Grecia, 89% en Chipre, 128% en Italia, 88% en España y 122% en Portugal.

El aumento de la deuda pública es consecuencia de los desajustes continuados en las políticas fiscales y presupuestarias, y de la asunción por el Estado, aunque sea de manera indirecta, de una parte apreciable de la deuda privada. La necesidad de intentar garantizar a los acreedores el cobro de la deuda ha sido el pretexto utilizado por el Fondo Monetario Internacional (FMI), el Banco Central Europeo (BCE) y la Comisión de la UE para imponer duras políticas de ajuste económico y presupuestario.

Al menos de momento, estas políticas sólo han conseguido un empobrecimiento de amplias capas de la población, un espectacular aumento del desempleo, sobre todo de los jóvenes, y una práctica anulación del crédito bancario a empresas y a particulares. La troika ha impuesto además, fundamentalmente en Grecia y en Portugal, un desmantelamiento de los servicios públicos. Los países del sur de la UE se ven así inmersos en una



# El camino más firme



Fresadoras, Recicladoras  
Extendedoras de hormigón  
Estabilizadores, Minadores



Extendedoras de asfalto  
y suelo-cemento



Compactadores de tierras  
Rodillos vibrantes  
Compactadores de neumáticos



Plantas asfálticas  
Equipos de reciclado  
en central



Instalaciones fijas y móviles  
de trituración, cribado  
y reciclaje



Equipos para conservación  
invernal / vial de carreteras  
y aeropuertos

## OFICINAS CENTRALES

Crta. de la Marañosa Km. 0,8 • A-4 Salida Km. 20 • 28320 Pinto (MADRID)  
tel. 91 307 81 33 - fax 91 357 47 62 - [www.emsamaquinaria.es](http://www.emsamaquinaria.es)



profunda recesión cuyo final no está ni mucho menos próximo, y que se agrava por la inestabilidad de los gobiernos, una situación de la que de momento sólo se ha salvado España.

En este marco se inscribe una drástica disminución de las inversiones públicas y, por tanto, también en materia de infraestructuras de transporte. Éstas, sobre todo en España y en Portugal, habían desempeñado en las décadas pasadas un papel importantísimo, tanto de modernización como de dinamización de la economía. Habían sido, así mismo, un elemento clave en la mejora de la competitividad. Ahora, en cambio, se ha renunciado a la posibilidad de que la continuidad de estas inversiones pudiera servir como amortiguador de la recesión económica, como sucedió en otros países y en otras épocas.

La disminución de las inversiones no ha afectado de la misma manera a todos los modos de transporte. En particular, el modo más afectado en España ha sido, con notable diferencia, la carretera: se ha paralizado el proceso de desarrollo y de modernización de las redes viarias. Afortunadamente, el impulso continuado que había tenido este desarrollo desde la mitad de la década de los '80 hace que, en este momento, y a pesar de todo, la accesibilidad en la práctica totalidad del territorio esté garantizada, y sólo existan algunos problemas de movilidad en las mayores conurbaciones.

Sin embargo, en lo que sí se está notando la disminución de las inversiones es en los imprescindibles trabajos de rehabilitación y de mejora de las carreteras existentes. En algunas de ellas ya empieza a resultar evidente el déficit de conservación, que se manifiesta sobre todo en la superestructura: pavimentos, señalización y dispositivos de contención de vehículos. No parece que las administraciones titulares de las vías tengan una suficiente sensibilidad sobre la trascendencia de la conservación viaria precisamente en estos tiempos de recesión económica.

Por tanto, si hoy se preguntara en España, como en otros países, qué es lo que se necesitaría para poder llevar a cabo una adecuada conservación de las carreteras, la primera respuesta, la más inmediata, sería que dinero. De acuerdo con lo expuesto, parece una respuesta lógica. Sin embargo, la respuesta correcta no es tan simple. Se necesita dinero, ciertamente, pero no sólo dinero. Se podrían poner muchos ejemplos de que con más dinero las cosas pueden no hacerse mejor; en última instancia, y siempre que se superen unos mínimos que en España no debería haber problemas para alcan-

zar, los presupuestos disponibles son simplemente un dato de partida.

## NECESIDAD DE UNA POLÍTICA DE CONSERVACIÓN

Lo primero que se requiere para la conservación de las carreteras, mucho más en tiempos de recesión económica, es una política de conservación o, si se quiere expresar de otro modo, una voluntad política de dedicar atención, esfuerzos y recursos a la conservación de las carreteras; es decir, a preservar el patrimonio viario y actuar sobre la infraestructura viaria para atender a las necesidades de los ciudadanos, muchas de las cuales no pueden ser atendidas por otros modos de transporte.

Los responsables políticos deberían ser conscientes de que un buen estado de las carreteras es esencial para garantizar un transporte de mercancías eficiente, para satisfacer en todo momento, en condiciones de seguridad y de razonable comodidad, la movilidad de las personas y para que no se vea comprometida la accesibilidad a ningún punto del territorio. Todo ello sin olvidar el hecho de que un mal estado de los pavimentos provoca un aumento tanto del consumo de combustibles como de la emisión de gases de efecto invernadero.

Parece como si en tiempos de recesión económica la necesidad de llevar a cabo ajustes dejara en un segundo plano las preocupaciones ambientales. Esto carece de cualquier justificación. La sostenibilidad del sistema viario es un requisito esencial para la recuperación económica y, en ese sentido, los criterios ambientales son de imprescindible consideración. Por tanto, la política de conservación viaria debería tener entre sus objetivos el aumento de la eficiencia del transporte por carretera desde un punto de vista energético y ambiental.

## ESTRUCTURAS PARA LA CONSERVACIÓN

Lo que se requiere en segundo lugar para la conservación de las carreteras es contar, en el ámbito de la administración titular correspondiente, con una organización específica. Es importante que la estructura dedicada a la conservación esté desligada de otras actividades de la ingeniería viaria, como pueden ser las de proyecto o las de construcción, pues en caso contrario a éstas se les acaba dando una mayor importancia, en detrimento de las de conservación.



También sería recomendable que, aun manteniendo la unidad de los objetivos generales, la estructura de conservación esté separada de la dedicada a la explotación en sentido estricto, pues estas últimas actividades son en general muy absorbentes, en todos los aspectos, y la conservación se resiente por ello. Todas estas consideraciones son independientes de que las estructuras a las que se hace referencia estén insertas, como era tradicional, en una administración pública, o por el contrario lo estén en una agencia pública o semipública con un mayor o menor grado de autonomía funcional y económica.

## RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES

El tercer requerimiento para llevar a cabo la conservación de las carreteras es contar con los recursos humanos y materiales adecuados, tanto en la organización específica a la que se ha hecho referencia en el apartado anterior, como en las empresas a las que se les pueda haber adjudicado, bajo diversas fórmulas (de contratación o de concesión administrativa), la ejecución de las distintas actividades de conservación o de una parte de ellas. Tanto los medios humanos como los materiales deberían estar dedicados de manera permanente y exclusiva a las actividades de conservación.

En cuanto a los medios materiales, hay que disponer de maquinaria, materiales de construcción, depósitos y talleres, centros de control de las actividades, etc; aun sin ser tan exigentes como las actividades de explotación en sentido estricto, las de conservación precisan también de una coordinación basada en un adecuado sistema de comunicaciones. Por otro lado, las actividades de conservación requieren un personal específicamente adscrito a ellas, con la mayor experiencia posible en carreteras, altamente especializado en cada una de las diversas tareas y con una formación acorde con los distintos niveles de responsabilidad: ingenieros, técnicos, operarios especializados, etc.

Lo que debe subrayarse en este sentido es que la incorporación de las personas que se van a dedicar a la conservación viaria no puede ser el fruto de la improvisación. En general, la competencia técnica y la experiencia requeridas son superiores que las que se precisan para otro tipo de actividades, como pueden ser las de construcción.

## RECURSOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS

Junto a todo lo anterior, es evidente que para la conservación de las carreteras son imprescindibles unos recur-

sos económicos y financieros. Es esencial que los fondos dedicados a la conservación de las carreteras tengan, de entrada, las siguientes tres características:

- Estabilidad, sin apreciables variaciones de unos años a otros, ni al alza ni a la baja (salvo las que se requieran para hacer frente a los nuevos desarrollos viarios y para absorber el incremento de costes como consecuencia de la inflación).
- Conocimiento anticipado por todos los agentes involucrados, a fin de que las actuaciones de conservación puedan ser convenientemente planificadas y para que las empresas intervinientes en los procesos puedan adaptar sus estructuras a lo que se espera de ellas.
- Garantía por largos períodos de tiempo, puesto que la planificación de la conservación se debe realizar a medio o largo plazo. Esto supone, lógicamente, que debe haber una garantía también en la procedencia de los fondos que, en el caso de que fuesen de origen únicamente presupuestario, obligaría a consignaciones plurianuales.

Es perfectamente sabido que más grave que el hecho de que los fondos disponibles sean más o menos escasos es que no haya garantías a medio plazo sobre su disponibilidad real, pues eso impide la planificación de las actividades, sobre todo de las de rehabilitación.

Desafortunadamente, la mayoría de las administraciones públicas en épocas de recesión o de ajuste tienden a destinar los escasos fondos disponibles a la construcción de nuevas vías antes que a la conservación de las existentes, lo que no deja de ser paradójico. Si los ajustes obligan a una restricción de las inversiones en materia viaria, puede entenderse que se paralicen los nuevos desarrollos, pero no que se abandone la conservación de las carreteras ya en servicio.

Desde hace décadas existe un consenso sobre la cantidad mínima que se requiere anualmente para conservar las carreteras de una determinada red en un estado adecuado. Ese mínimo se podría fijar en el 2% del valor patrimonial de dicha red; si se consideran también las actuaciones más ligadas a la explotación, dicho porcentaje debería, sin embargo, aproximarse al 3%.

La experiencia en España muestra que, en particular, para mantener un adecuado estado de los pavimentos, la mitad de esas cantidades se debe destinar a éstos, es decir, entre el 1 y el 1,5% del valor patrimonial de la red anualmente. Fijar cuál es dicho valor patrimonial puede hacerse por varios métodos que conducen a

resultados distintos, pero esta falta de precisión no resulta tan importante en la práctica.

Junto a la financiación tradicional presupuestaria, en la que los recursos proceden de las consignaciones aprobadas anual o plurianualmente por el correspondiente órgano legislativo (parlamento), en las dos últimas décadas ha ido teniendo una importancia creciente en muchos países la financiación extrapresupuestaria. Ésta puede ser pública, privada o mixta, y se suele materializar a través de un fondo gestionado por una agencia pública que tiene libertad (lo que no quiere decir falta de control) para utilizar una variedad de recursos.

Hasta hoy no se ha demostrado que ningún modelo concreto sea más eficiente que los restantes, y se puede dar ejemplos y contraejemplos en cualquier sentido. La elección de uno u otro modelo se debe basar en conseguir los objetivos formulados en la política de conservación con los menores costes para los ciudadanos, entre los que se deben incluir, lógicamente, no sólo los de las actuaciones, sino también los costes de préstamos bancarios y de remuneración de los capitales privados invertidos, los ambientales y los repercutidos a los usuarios como consecuencia de los propios trabajos de conservación o del estado en el que se encuentren los pavimentos.

Desgraciadamente, la elección del modelo viene condicionada, a menudo, tanto por prejuicios ideológicos, como por la acción de lobbies de distinta naturaleza; de ser así, es fácil comprender que no habrá ninguna garantía sobre su verdadera eficiencia.

## DISPONIBILIDAD DE UNA TECNOLOGÍA ESPECÍFICA PARA LA CONSERVACIÓN

El último de los requisitos para poder llevar a cabo la conservación de las carreteras es la disponibilidad de una tecnología específica. A este respecto, hay que empezar subrayando que la tecnología para la conservación viaria es realmente más compleja que la necesaria para el proyecto o la construcción. Además, se necesita, como ya se ha apuntado más arriba, una mayor experiencia, tanto para su desarrollo, como para su aplicación.

Razones técnicas y económicas hacen imprescindible que la administración o la agencia correspondiente tengan implantado un verdadero sistema de gestión, convenientemente adaptado a las peculiaridades que pudiera tener la red en cuestión (I). Además, debe existir una amplia disponibilidad de equipos y de procedimientos

de auscultación, especialmente para la valoración de la resistencia al deslizamiento y de la regularidad superficial.

Así mismo, es importante que los procedimientos de rehabilitación de pavimentos sean adecuados para abordar la situación de la red vial, sin innecesarias rigideces en sus planteamientos a la hora de diseñar las rehabilitaciones estructurales o las renovaciones superficiales. Se puede finalizar destacando la importancia de tener a punto procedimientos de actuación preventiva, que son, en definitiva, mucho más eficientes que los de actuación curativa; sobre este punto se volverá más adelante.

Puede aparecer un primer problema en la utilización de los sistemas de gestión cuando no se ha establecido una diferenciación nítida entre los indicadores de servicio y los indicadores de estado. Los primeros se refieren a la explotación en sentido estricto, es decir, al servicio que se presta, mientras que los segundos se refieren a los elementos de la carretera que son objeto de las actuaciones de conservación.

Un problema aún mayor es el derivado de pretender emplear un número exagerado de indicadores. Una gestión eficiente puede y debe basarse en un número limitado de indicadores, quizás cuatro o cinco. El basar la gestión en muchos indicadores no la mejora, pero la complica en extremo, mucho más si se carece de la suficiente experiencia en su manejo.

En relación con este punto, hay que poner de manifiesto un error conceptual relativamente común: en muchos casos no se manejan indicadores realmente, sino parámetros resultantes de determinadas mediciones.

Debe tenerse en cuenta que un indicador es simplemente una nota o calificación con la que valorar de manera objetiva, de un modo cuantitativo y en un momento determinado, el servicio que se presta (indicador de servicio) o la situación en la que se encuentra un elemento de la infraestructura que soporta ese servicio (indicador de estado); la cuantificación y la objetivación se llevan a cabo midiendo en cada caso uno o varios parámetros, que son los que deben ser utilizados, mediante la función de transformación correspondiente, para establecer el valor del indicador. Si alguno de los "indicadores" que se quiere utilizar es el resultado de una apreciación subjetiva, se debe desechar como tal indicador.

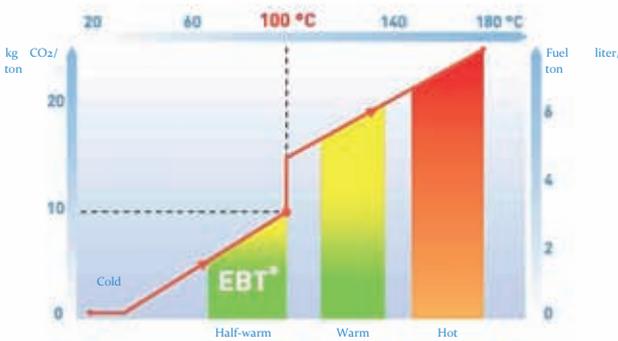
El indicador da una valoración en un momento determinado. Tanto para que sirva realmente como elemento de gestión, como para poder fijar adecuadamente los umbrales de referencia (de calidad inicial, de atención o de actuación conveniente, de actuación necesaria y



With half-warm bituminous mixtures,  
we change the Highway Code.



Creditphoto: Getty Images, www.road.com



### Half-warm bituminous mixtures, a new generation of asphalt mixtures

For a more responsible future, Eiffage Infraestructuras has developed half-warm bituminous mixtures.

Manufactured below 100°C and laid at 75°C, this low energy asphalt has outstanding properties:

- energy consumption twice lower than a conventional hot mix asphalt,
- decrease of 50% in emissions of greenhouse gases,
- unmatched confort in laying.

World award AIPCR 2007  
for sustainable development

[www.infraestructuras.eiffage.es](http://www.infraestructuras.eiffage.es)



de inaceptabilidad) es imprescindible que se conozca cómo el indicador puede variar con el tiempo, es decir, es imprescindible contar con modelos de evolución. Para poder contar con modelos de evolución, hay que llevar a cabo siempre, en primera instancia, aproximaciones apriorísticas. Es decir, hay que empezar proponiendo modelos referenciados en la literatura técnica o desarrollarlos con las técnicas matemáticas adecuadas (análisis markovianos, por ejemplo); estos modelos se habrán de ir calibrando y ajustando con el tiempo, según se vaya disponiendo de mediciones reales del parámetro o de los parámetros sobre los que se basa el indicador.

Los modelos de evolución son uno de los componentes de un sistema de gestión. Por tanto, resulta bastante claro que, si no está implantado un sistema de gestión, es más que dudoso que se cuente con modelos de evolución adecuadamente calibrados y, en consecuencia, no tiene sentido utilizar unos umbrales de los indicadores que cabría incluso calificar como arbitrarios.

Y si no hay un sistema de gestión, no pueden establecerse adecuadamente, ni mucho menos valorarse correctamente, las distintas estrategias posibles de actuación en materia de conservación, unas con una componente más o menos preventiva, otras predominantemente curativas.

En definitiva, si no hay un sistema de gestión, las decisiones no estarán suficientemente fundamentadas y, aunque no es discutible que en última instancia las decisiones han de corresponder a los responsables políticos, dichas decisiones quedarán al albur de su mejor criterio, desgraciadamente condicionado a menudo por el clientelismo político, la visión electoral a corto plazo o las presiones de los medios de comunicación.

## IMPORTANCIA DE LAS ACTUACIONES PREVENTIVAS

En el marco de la gestión de la conservación, se denomina estrategia de conservación a cada una de las posibles combinaciones de actuaciones (tanto de conservación ordinaria como de rehabilitación) que sea factible realizar a lo largo del tiempo, en aras del cumplimiento de los objetivos planteados en la correspondiente política de conservación.

Como es fácil de comprender, todo programa de conservación lleva implícita una determinada estrategia. Cada una de las posibles estrategias tendrá un determinado coste y producirá unos ciertos efectos sobre la

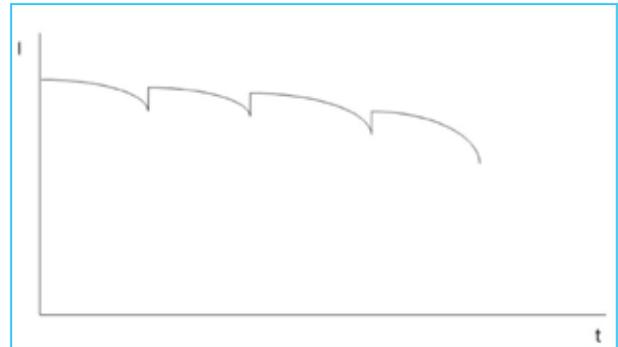


Figura 1. Esquema de modelo de evolución correspondiente a una estrategia básicamente preventiva.

vía y sobre su previsible evolución a partir del momento de cada actuación. Por ello, los sistemas de gestión deben, entre otras cosas, ser capaces de llevar a cabo un análisis comparativo (técnico y económico) entre las diversas estrategias que se pudieran considerar, siempre que todas ellas estén dirigidas en similar medida a la consecución de los objetivos de la política de conservación. En todo caso, para cada posible estrategia será preciso valorar el grado de cumplimiento de esos objetivos.

Cualquier posible estrategia de conservación se sitúa entre dos estrategias extremas:

- La estrategia con un carácter básicamente preventivo, consistente en actuaciones de coste limitado y relativamente poco separadas en el tiempo, de manera que los indicadores de estado descieran relativamente poco (no se sobrepasan en ningún caso los correspondientes umbrales de actuación conveniente). Como es sabido, las curvas de los correspondientes modelos de evolución tienen, en este caso, forma de sierra (Fig. 1).
- La estrategia con un carácter fundamentalmente curativo, consistente en actuaciones de mayor coste y más separadas en el tiempo, de manera que los indicadores de estado llegan a caer apreciablemente, incluso casi hasta el umbral de inaceptabilidad. Las curvas de los correspondientes modelos de evolución son entonces un encadenamiento de curvas completas (Fig. 2).

En la práctica, esas dos estrategias extremas a las que se acaba de aludir se traducen, respectivamente, en las siguientes opciones para los pavimentos de las carreteras:

- Aplicación cada pocos años (normalmente entre 3 y 6, según la intensidad del tráfico pesado y las condiciones climáticas) de una renovación superficial (según el tipo de vía: riego con gravilla, lechada bituminosa, microaglomerado u hormigón asfáltico en un espesor de 3-5

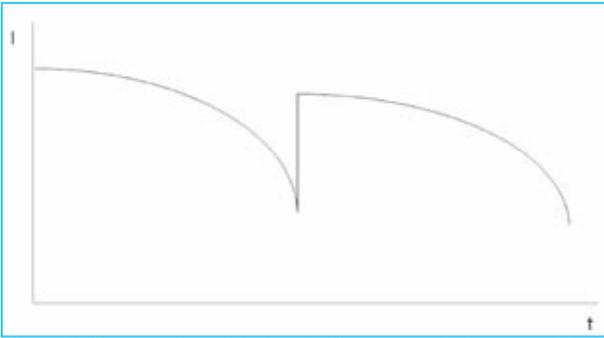


Figura 2. Esquema de modelo de evolución correspondiente a una estrategia fundamentalmente curativa.

cm), combinada con un sellado permanente de grietas y la inmediata reparación de otros deterioros localizados que pudieran aparecer.

- Rehabilitación estructural cada bastantes años (normalmente entre 12 y 16, según la intensidad del tráfico pesado y las condiciones climáticas) mediante recrecimiento, fresado y reposición (más recrecimiento) o reciclado (más recrecimiento), combinada con la reparación de sólo los deterioros localizados de mayor entidad que pudieran aparecer (grandes blandones, baches importantes, ...).

Las administraciones o agencias que no tienen implantado un verdadero sistema de gestión tienden a utilizar estrategias de conservación que no responden realmente a ninguna programación y que suelen estar más próximas al segundo extremo de los citados. Hay así un aparente ahorro de costes de conservación (aunque un análisis económico global demostraría que en la mayoría de los casos no es así), pero trasladando importantes costes a los usuarios, en la medida en que un peor estado del pavimento supone un aumento notable de los costes de operación, además de un empeoramiento de las condiciones de seguridad de la circulación (se trataría realmente de una especie de tasa encubierta, con una clara afección negativa en la eficiencia del sistema).

## CONCLUSIONES

En el marco de la recesión económica se inscribe una drástica disminución de las inversiones en materia de infraestructuras de transporte. Esa disminución está provocando que se dedique menos atención de la debida a los imprescindibles trabajos de rehabilitación y de mejora de las carreteras.

Los responsables políticos deberían ser conscientes de que un buen estado de las carreteras es esencial

para garantizar un transporte de mercancías eficiente, para satisfacer en todo momento, en condiciones de seguridad y de razonable comodidad, la movilidad de las personas, y para que no se vea comprometida la accesibilidad a ningún punto del territorio.

La incorporación de las personas que se van a dedicar a la conservación viaria no puede ser el fruto de la improvisación. En general, la competencia técnica y la experiencia requeridas son superiores que las que se precisan para otro tipo de actividades, como pueden ser las de construcción.

Es esencial que los fondos dedicados a la conservación de las carreteras tengan las siguientes características: estabilidad, sin apreciables variaciones de unos años a otros; conocimiento anticipado por todos los agentes involucrados y garantía por largos períodos de tiempo.

La elección de uno u otro modelo de financiación de la conservación se debe basar en conseguir los objetivos formulados en la política de conservación con los menores costes para los ciudadanos, entre los que se deben incluir, lógicamente, no sólo los de las actuaciones, sino también los costes de préstamos bancarios y de remuneración de los capitales privados invertidos, los ambientales y los repercutidos a los usuarios como consecuencia de los propios trabajos de conservación o del estado en el que se encuentren los pavimentos.

Tanto por razones técnicas como económicas, es imprescindible que la administración o la agencia correspondiente tengan implantado un verdadero sistema de gestión, convenientemente adaptado a las peculiaridades que pudiera tener la red en cuestión.

Debe destacarse la importancia de tener a punto procedimientos de actuación preventiva, mucho más eficientes que los de actuación curativa.

Las administraciones o agencias que no tienen implantado un verdadero sistema de gestión tienden a utilizar estrategias de conservación que suelen estar más próximas a las puramente curativas. Hay así un aparente ahorro de costes de conservación, pero trasladando importantes costes a los usuarios.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) De Solminihaç, H., 2001, "Gestión de infraestructura vial", Ediciones de la Universidad Católica de Chile, 508 pág.

# Desarrollo de los puentes en España

Javier MANTEROLA ARMISÉN  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

## RESUMEN

*El proyecto y construcción de puentes en España durante las dos últimas décadas ha derivado en un reconocimiento internacional de la industria española de la construcción. La primera mitad del siglo XX fue especialmente brillante en la configuración de tipos estructurales bellos y económicos. La evolución posterior permitió optimizar lo clásico (puentes de vigas, puentes losa, puentes empujados, de hormigón y acero, puentes arco, atirantados...) y aventurar y abrir al tiempo mundos formales y constructivos diferentes.*

*En el artículo se describe un conjunto de puentes realizados en España en los últimos veinte años, elegidos entre la enorme contribución de los ingenieros españoles al desarrollo de este ámbito de la actividad constructiva. Se ordenan por tipología: puentes viga, arco y atirantados recientes. En concreto, los puentes sobre el río Duero en Zamora, el de Zizur, el de Tina-Menor, el de García Sola, el de Gorostiza, el puente de Endarlatsa, el puente sobre el río Galindo, el puente sobre el río Ebro en Logroño, la pasarela sobre el río Ebro en la Expo de Zaragoza, el puente Príncipe de Viana sobre el río Segre en Lleida, y el puente sobre la Bahía de Cádiz.*

**Palabras clave:** Puente, Obra Singular, Construcción, Ingeniería, Proyecto

## INTRODUCCIÓN

Se podría decir que el desarrollo de los puentes en España, su diseño y construcción, ha alcanzado un lugar puntero en el mundo. Muchos años de construcción continuada, muchos ingenieros pensando en lo hecho y mejorándolo han configurado una industria de la construcción excelente que hoy en día extiende su presencia en los cinco continentes. Se es preciso, justo, exacto... Se es económico y rápido.

Los puentes son una más de las manifestaciones de la construcción inscrita en el mundo de la carretera, a la cual nos vamos a reducir.

Durante todo el siglo XX, el desarrollo de los puentes metálicos, de hormigón y mixtos ha sido espectacular. Los procedimientos modernos de acotamiento de esfuerzos y deformaciones son tan precisos que han

proporcionado una enorme seguridad y confianza para adoptar configuraciones nuevas, solo posibles por el dominio de las distintas variables que constituyen el mundo de la construcción hoy en día.

La primera mitad del siglo XX fue enormemente brillante en la configuración de tipos estructurales bellos y económicos. Tan buena fue su producción que casi frenó la evolución del diseño, atado como estaba a configuraciones clásicas y eficaces. La construcción y los procedimientos constructivos asociados a las tipologías clásicas hacían especialmente difícil la evolución tipológica por miedo a introducirse en terrenos movedizos, fuera de la seguridad de lo clásico.

En España se ha evolucionado bien, muy bien, optimizando lo clásico (puentes de vigas, puentes losa, puentes empujados, de hormigón y acero, puentes arco, puentes atirantados...) y aventurándose y abrien-

do mundos formales y constructivos diferentes.

Se presenta un conjunto de puentes realizados en España en estas últimas dos décadas, elegidos entre la enorme contribución de los ingenieros españoles al desarrollo del mundo de los puentes, ordenándolos por tipologías: puentes viga, arco y atirantados recientes.

### PUENTE SOBRE EL RÍO DUERO EN ZAMORA (2010)

En el puente sobre el río Duero (Figura 1), que utiliza la Autopista de la Plata, la separación entre calzadas era muy grande, por lo que la idea de realizar una sola pila de cuatro brazos (Figura 2) se sustituyó por dos puentes con dos pilas separadas. La separación entre los ejes de las dos calzadas es de 20,5 m y el puente longitudinalmente se organiza en seis luces de 34,5 m+36 m +49,5 m +72,00 m+49,5 m+34,5 m.

La pila en "V" tiene una altura de 7,9 m y una envergadura longitudinal de 40,9 m.

Longitudinalmente el puente está constituido por una viga cajón de 90,5 m de envergadura, que utiliza en la parte inferior una viga en "U" de 1,9 m de canto con 3,1 m de anchura. Sobre la "U" se disponen losas prefabricadas con 3,5 m de vuelo sobre las vigas en "U". Todos los elementos del puente -pilas en "V", viga y losas del tablero- fueron prefabricados (Figura 3).

### PUENTE DE ZIZUR (2002)

Esta obra resuelve el problema de la salida desde Pamplona de la nueva Autopista a Logroño; fue construida por el Gobierno de Navarra, a su paso por Zizur Mayor, pueblo residencial situado a 6 km de Pamplona y que quedaba dividido en dos por la Autopista (Figura 4).

Tres propósitos cumplen la obra de Zizur. Uno simplemente estructural, referido a cómo deben ser los puentes instalados en una glorieta circular. Otro, y tan importante como el primero, realizar un enlace peatonal reduciendo al



Figura 1. Puentes sobre el río Duero - Zamora.



Figura 2. Proyecto de pila central para el puente de Zamora.

mínimo el salto visual que se produce al pasar de un lado al otro del parque y cruzar sobre una autopista -el parque debe pasar sobre la autopista-. En tercer lugar, y siguiendo una indicación del Gobierno de Navarra, establecer un "hito", una puerta de entrada o salida de Pamplona para todos aquellos que van o vienen de Logroño.

Por ello, como glorieta circular, se ha realizado un disco completo que, apoyado únicamente en cuatro puntos, resuelve el problema circulatorio y estructural de una sola vez. Realizar un "plato" agujereado en el centro por un círculo de 47,2 m de diámetro interior y con 73,8 m de diámetro exterior y una estructura apoyada en cuatro puntos resulta un problema resistente importante. Las torsiones que se producen son formidables, así como su acoplamiento con las flexiones, lo que conduce a un pretensado bastante complejo, pero, sin embargo, el resultado formal final es sorprendente y muy hermoso. La sección transversal de este plato o disco es circular también y sus bordes han sido tratados con cuidado (Figura 5).

Para los peatones se ha realizado otro puente diferente, adosado al puente viario y rodeado de jardín con el fin ya referido de minimizar la presencia de la autopista en el peatón.

Finalmente, de acuerdo con la dirección del proyecto, se trata de construir una puerta de entrada o salida de

Pamplona. Sigue el buen resultado obtenido en el arco de Ventas, pero en este caso con dos arcos de 100 m de luz en lugar de uno.

### **PUENTE DE TINA MENOR - AUTOPISTA DEL CANTÁBRICO, CANTABRIA (2001)**

Se trata de un puente continuo de 378,50 m de longitud, formado por cuatro vanos de 64,25 m+125 m +125 m+64,25 m.

Las pilas son de hormigón armado con alturas de 18,33 m y 37 m (Figura 6).

El dintel, mixto, tiene una anchura de 30 m y un canto constante de 6,50 m. La sección transversal está formada por un cajón central de 10 m de anchura y unos voladizos transversales de 10 m cada uno. El soporte de estos voladizos se realiza por un apuntalamiento triangulado que constituyen dos nuevas células laterales que ayudan al cajón central en su trabajo a torsión. En este puente se realizó un exhaustivo cálculo del comportamiento no lineal del cajón metálico, así como del comportamiento a largo plazo de la interacción entre la losa de hormigón y la viga metálica. La losa de hormigón está pretensada (Figura 7).

### **PUENTE DE GARCÍA SOLA (2004)**

La carretera N-430 cruza el Guadiana al pie de la presa del embalse de García Sola. El trazado cruza el río a cincuenta metros de altura en una zona donde el ancho del río embalsado es de unos ciento veinte metros. Se trata de una carretera de dos carriles con un ancho de doce metros. En este punto se debe hacer un puente que cruce un canal de regadío, el río y la carretera de acceso a la presa.



Figura 3. Puente sobre el río Duero en Zamora. Colocación del dintel sobre las pilas.

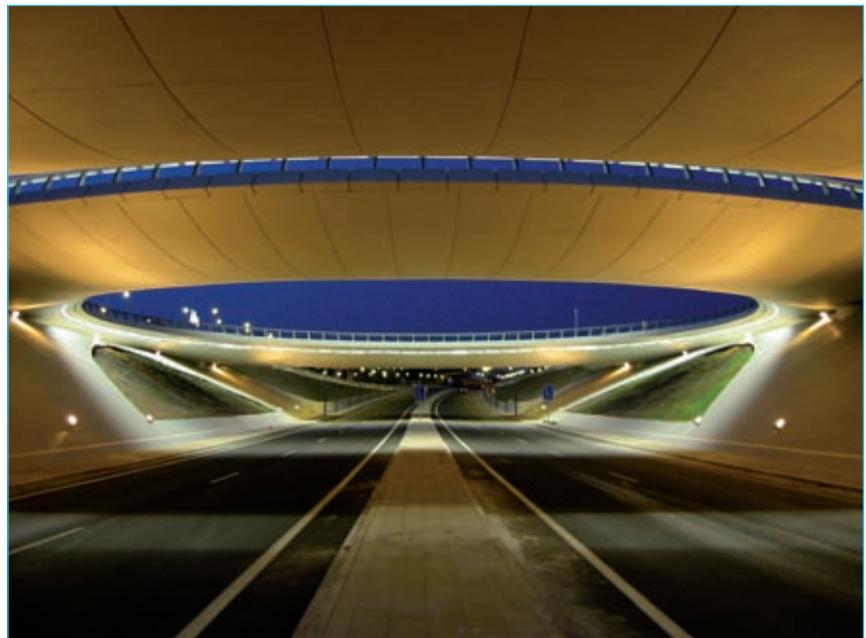


Figura 4. Puente de Zizur.



Figura 5. Puente de Zizur. Sección transversal.

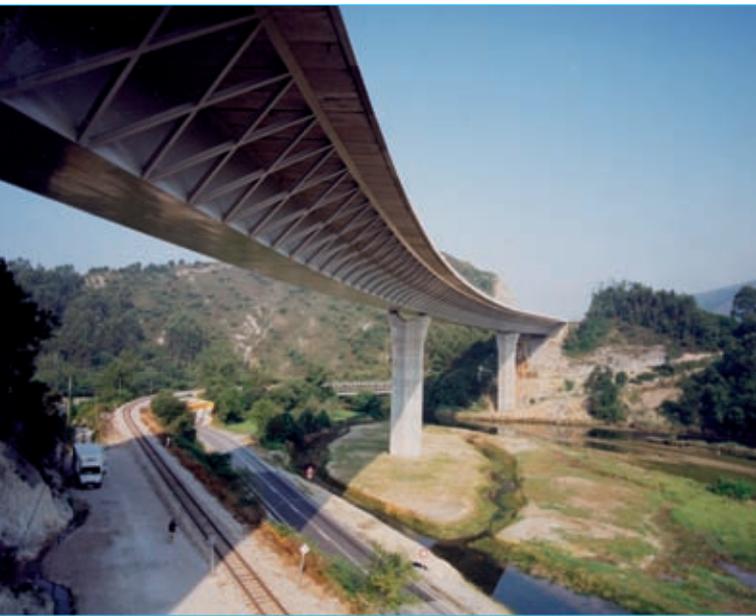


Figura 6. Puente de Tina Menor.



Figura 7. Vista inferior del Puente de Tina Menor.

Se trata de un puente de celosía tubular continua de canto constante con cinco vanos. Las luces son de 99 m, 132 m, 132 m, 110 m y 88 m, lo que arroja un total de 561 m de longitud y una anchura de 14 (Figura 8).

La celosía espacial tiene sección triangular. El cordón inferior está formado por un tubo de acero de un metro de diámetro, mientras que el cordón superior tiene dos tubos de acero de ochenta centímetros de diámetro unidos a la losa superior de hormigón armado, con la que forma una sección mixta, de hormigón y acero, y que materializa la plataforma. El canto de la celosía es de siete metros entre ejes de tubos.

El apoyo del cordón inferior en las pilas y estribos se realiza bifurcando en dos el tubo inferior, abriéndose hacia los aparatos de apoyo separados cinco metros entre sí. Con esto se consigue la estabilidad del puente, que es curvo en planta.

Las diagonales de la celosía son tubos de acero de cincuenta centímetros de diámetro dispuestos en forma espacial con once metros de separación. Con esta disposición se unen cuatro tubos al cordón inferior y dos a cada uno de los tubos superiores. La unión de las diagonales a los tubos principales se realiza por soldadura directa, sin cartelas, obteniéndose un aspecto limpio y ordenado de la estructura.

Los tubos superiores se unen entre sí cada once metros mediante una viga metálica doble T para recoger la carga horizontal transversal que introduce la componente de los tubos de las diagonales (Figura 9).

Las vigas en celosía son más deformables que las de alma llena. Para disminuir esta deformabilidad se recurrió a la colocación de dos cables de pretensado que, desde el cordón inferior en el centro del vano, suben hasta los tubos superiores en las pilas. Este procedimiento parecía más económico que aumentar el espesor de las diagonales en la zona de apoyo.

La losa superior es de hormigón armado de veinticinco centímetros de espesor sobre un enrejado de vigas metálicas doble T, para reducir la luz de catorce por once metros que forma la cuadrícula superior.

Las pilas son de hormigón armado con fuste elíptico de sección constante y un cabezal superior que se abre para recoger los apoyos de la celosía. Las pilas tienen



Figura 8. Puente de García Sola.

El mundo está cada vez más  
y mejor conectado.

Trabajamos para hacer  
este reto realidad.

En Ineco trabajamos para conectar lugares, ciudades, países y continentes. Somos expertos en diseño y desarrollo de aeropuertos, sistemas de navegación aérea, redes ferroviarias convencionales y de alta velocidad, transporte urbano, carreteras y puertos. Nuestra experiencia y alta capacidad técnica nos ha llevado a desarrollar proyectos en más de 40 países de América, Europa, África, Oriente Medio y Asia. Nuestros más de 200 contratos internacionales incluyen desde la planificación hasta la explotación y mantenimiento de los proyectos de infraestructuras. Todo esto es posible gracias al talento y especialización de nuestros más de 2.500 profesionales que trabajan cada día por conseguir un mundo más y mejor conectado.

**ineco**  
Ingeniería y Consultoría de Transporte  
[www.ineco.com](http://www.ineco.com)



AERONÁUTICO / FERROVIARIO / CARRETERAS / TRANSPORTE URBANO / PUERTOS



una altura entre veinte y cuarenta metros. El fuste es una sección hueca de tres metros sesenta centímetros de eje mayor, transversal al puente, y dos metros cuarenta centímetros de eje menor. El espesor de las paredes es de cuarenta centímetros. La cimentación se ha realizado por medio de zapatas de hormigón armado ya que la roca es casi superficial salvo en las orillas del río, que hay que bajar cerca de cuatro metros.

### PUENTE DE GOROSTIZA (2007)

La variante sur metropolitana de Bilbao cruza el embalse de Gorostiza en un estrechamiento del mismo y con sendos túneles en sus extremos. En el lado sur se juntan las calzadas para reducir el desmonte de la media ladera que se produce. Los puentes, uno por calzada, se sitúan en un entorno de gran valor paisajístico (Figura 10).

Es el puente que todo proyectista ha deseado hacer. Saltar limpiamente de una a otra ladera sin apoyos intermedios.

Se trata de dos puentes casi idénticos de ciento treinta metros de luz central con dos vanos de compensación de treinta metros de luz. Estos vanos laterales, instalados dentro de una caja que les deja dilatarse libremente, forman el contrapeso del central y quedan embebidos por los estribos del puente. La plataforma de paso consta de tres carriles, dos arcones y las defensas laterales, con una anchura total de trece metros con sesenta centímetros.

El vano central está formado por un cajón mixto de canto variable entre un metro noventa centímetros en el centro de la luz y cinco metros con treinta en su unión con los contrapesos. El cajón tiene almas inclinadas, lo que da lugar a que la chapa de fondo sea de ancho variable: entre dos metros y medio en el arranque y cinco metros en el centro. El cajón está arriostrado transversalmente cada cuatro metros mediante marcos y puntales inclinados.

La losa superior de hormigón tiene un espesor de treinta y cinco centímetros, con voladizos laterales de tres



Figura 9. Puente de García Sola.



Figura 10. Puente de Gorostiza - Vista lateral.



Figura 11. Vista inferior del Puente de Gorostiza.

metros donde se reduce el espesor hasta veinticinco centímetros en el extremo. Hay además una losa inferior de hormigón, para crear una doble acción mixta, con espesor variable entre cuarenta y ochenta centímetros, que se extiende desde el apoyo hasta veinte metros hacia el centro del vano (Figura 11)

## PUENTE SOBRE EL RÍO DUERO EN ZAMORA (2012)

No es una arcada múltiple, ni una serie de arcos tímpano sucesivos; se trata de un puente continuo de seis vanos de 424,5 m de longitud y 92 m de luz.

La sección transversal es un cajón de canto variable entre 9 m en el apoyo a 2,00 m en clave, con una anchura de 14,7 m y almas separadas 8,0 m (Figura 12).

El canto del puente llega hasta la cimentación, donde se coloca un apoyo deslizante para evitar empujes horizontales al suelo. El efecto de arcada múltiple está buscado intentando mostrar la versión que la tecnología actual puede ofrecer sobre la arcada de piedra múltiple tradicional.

El estribo 2 es especial. Se trataba de disponerlo bajo una glorieta circular de intercambio de tráfico con las vías de la orilla. Se decidió hacer esta glorieta en el aire para evitar el enorme muro circular que presentaría y que, además, debía dejar paso a un camino de ribera muy hermoso (Figura 13).



Figura 12. Puente sobre el río Duero en Zamora.



Figura 13. Vista lateral del vano situado junto a la margen izquierda.

## VIADOTTO CORSO ARGENTINA, PADUA (2003)

Entre las muchas actuaciones de diseño de puentes en el extranjero, se encuentra este puente.

En la circunvalación a la ciudad de Padua y en su conexión con la autopista que va a Venecia, se proyectó un viaducto de 543 m de longitud, constituido por 11 vanos de 40 m + 9 m x 51,5 m + 40 m.

Este viaducto está lleno de enlaces, rampas que suben y bajan a la autopista y al Corso Argentina (Figura 14).

El cuerpo central tiene 32 m de anchura y está formado por dos cajones trapeziales metálicos de 2 m de canto, 2,7 m de anchura inferior y 15,5 m de anchura superior, y



Figura 14. Puente de Padua, Corso - Argentina.

por dos almas verticales intermedias separadas entre sí 6,3 m (Figura 15).

Se plantean dos problemas especiales: el soporte del tablero. Y el muy complicado problema de cómo conjuntar la estructura de los enlaces que suben y

bajan del puente y la estructura principal del tronco.

Para el primero, se dispuso una pila en "V" con una anchura de 20 m en cabeza y 10 m en base. La inclinación de las pilas produce un fuerte tiro horizontal recogido por pretensado transversal en el dintel.

Disponer una pila única, aunque ésta pueda ser más grande que dos pilas individuales, parece importante para el apoyo del dintel doble que constituye el tablero (Figura 16).

Las pilas de 1,4 m de anchura son metálicas y están empotradas en el dintel (puente pórtico) y en la cimentación. Este hiperestatismo longitudinal fue posible por tratarse de un suelo extremadamente flexible y muy pobre, desde el punto de vista de la resistencia. La cimentación se realizó por pantallas.

El segundo problema, el del soporte de las rampas de acceso y su conexión resistente y visual con el tronco, se resolvió diferenciando entre las rampas que están muy despegadas del tronco, rampas 3 y 4, y aquella otra, rampa 2, que sube paralela al tronco.

En este caso, la rampa cuelga del tronco por medio de ménsulas transversales. Inicialmente, colgaba de tirantes, pero las excesivas deformaciones de torsión aconsejaron empotrarlas en el dintel principal (Figura 17).

Como ornamentación e iluminación, en el eje de la mediana, se dispusieron tres arcos de 150 m de luz en el eje del puente.



Figura 15. Vista inferior del dintel.



Figura 16. Pila tipo.



Figura 17. Unión de rampa de acceso con el tronco del viaducto. Puente de Padua.

## PUENTE DE ENDARLATSA (2007)

El Nuevo Puente de Endarlatsa cruza el río Bidasoa en la confluencia de Navarra, Guipúzcoa y Francia, aguas arriba del actual puente de hormigón armado al que tiene como misión sustituir.

Desde el punto de vista del trazado en planta, el nuevo puente cruza oblicuamente el río, desarrollándose desde

el lado guipuzcoano, en la mayor parte de su longitud, en un tramo de carretera circular con gran radio (3.500 m), que enlaza con otro tramo circular de radio más cerrado, 320 m, en el lado navarro, por medio de una clotoide de 66 m de longitud. Transversalmente, ajustándose al trazado anterior, se proporciona bombeo en la mayor parte del trazado, de valor constante del 2%, modificándose en la zona de la clotoide para conseguir en la curva circular un peralte del 7%.



Figura 18. Puente de Endarlatsa.



Figura 19. Puente sobre el embalse de Contreras.

El trazado en alzado del tramo del puente presenta, en su mayor parte, una pendiente del 2,5%, modificándose ligeramente en ambos extremos del puente por la proximidad de sendos acuerdos.

La anchura de la plataforma es claramente variable debido a que en todo el desarrollo del puente se sitúa un ensanchamiento progresivo de la calzada para habilitar, en sentido Navarra, un tercer carril que configura un ramal de salida que aparece inmediatamente al cruzar el río. Esto provoca que la anchura de la calzada varíe entre 11,85 m y 15,65 m (Figura 18).

La decisión de adoptar un arco para el cruce del Bidasoa, en este magnífico y simbólico emplazamiento, se vio facilitada por las buenas condiciones del terreno de cimentación -aunque como luego se comenta, en

la margen derecha la roca aflora a mayor profundidad de la inicialmente estimada-.

La luz resultante del cruce, para evitar cualquier pila dentro del cauce que produjera perturbación de fondo y del ecosistema, es de 100 m, y la altura de la rasante provoca que el rebajamiento del arco sea de 1/10, valor muy bajo pero que formalmente proporciona resultados más interesantes. La ausencia de cualquier apoyo, el canto del arco, apurado

hasta 1,0 m, la forma redondeada que presentan sus bordes y las pilas consiguen reducir la superficie interpuesta al flujo del agua, creando sobre elevaciones mínimas frente a las grandes avenidas.

Desde el punto de vista de la configuración formal del puente, se decidió elegir para la geometría del arco una planta curva que siguiera la marcada por la carretera. En casos de trazado curvo como éste, bastaría adoptar un

arco recto -como habitualmente se

hace- y acoplar la distribución de pilares al arco y al dintel, pero esto queda mal al no poder hacer coincidir siempre el eje del arco con el del tablero, y provocar, por tanto, un descentramiento entre ambos. Al hacer que el arco siga la geometría curva en planta del tablero, que es la geometría de la carretera, se consigue que la sucesión de pilas verticales que se colocan en la orilla y sobre el arco lleve la secuencia, colocación y geometría continua gobernada por el trazado.

El dintel tiene 190 m de longitud, estando formado por 10 luces de 15,00 m + 8x20 m + 15,00 m. Los cinco vanos centrales de 20 m de luz se apoyan sobre un arco parabólico de 100 m de luz y flecha en clave de 10 m. Este diseño sigue la línea de máxima sencillez elegida para el puente sobre el embalse de Contreras, de 261 m de luz (Figura 19).

El tablero está constituido por una viga cajón formada por una sección metálica en artesa con platabanda inferior de 5,0 m de anchura total, almas de 0,8 m de canto y pletinas sobre éstas de 0,55 m. Sobre la sección metálica se disponen prelosas de hormigón que sirven de soporte a una losa armada de hormigón "in situ" de 0,2 m de espesor. Para completar la sección, el cajón se prolonga con vuelos laterales apoyados en costillas metálicas dispuestas cada 2,5 m con sección en doble T. Para liberar al arco de esfuerzos, el tablero sólo se fija a torsión y transversalmente en las pilas situadas sobre los arranques del arco y en estribos en las demás pilas, el dintel se apoya en el arco (Figura 20). Dadas las dimensiones tan reducidas de la sección del cajón, las deformaciones por torsión que se producirían en el tramo libre de 100 m serían importantes, por lo que se rigidiza superiormente con una chapa completa conectada al hormigón.



Figura 20. Vista inferior del puente de Enderlatsa.

La losa de hormigón se conecta a la sección metálica por medio de pernos conectadores situados sobre las pletinas superiores. De esta forma, el comportamiento longitudinal del tablero se ajusta al de una clásica sección mixta construida sin apeos: sección metálica para resistir las cargas de peso propio y sección mixta para el resto de cargas introducidas una vez realizada la conexión.

El arco está constituido por dos tubos de borde de 1,00 m de diámetro y 25 mm de espesor rellenos de hormigón sin retracción de alta resistencia HA-60. Para completar la sección del arco, los dos tubos se unen con dos chapas tangentes horizontales en los bordes superior e inferior de 25 mm de espesor rigidizadas longitudinal y transversalmente. Por tanto, el comportamiento del arco es también el de una sección mixta acero-hormigón. La anchura de su sección transversal es variable, con 3,00 m en clave y 5,00 m en arranques. La geometría resultante de los tubos de borde, conjugando el trazado curvo en planta de su eje y la referida anchura variable, se traduce en dos curvas diferentes para cada tubo de borde (con

radios en planta aproximados de 2.400 m y 820 m). Esta curvatura, unida a la curvatura de la parábola de su alzado, se traduce en una curva alabeada, cuya ejecución se realizará curvando los tubos en un taller metálico adecuado para esta operación (Figura 20).

El condicionante principal del proceso de construcción fue la exigencia de no afectar en medida alguna el río. Por dicho motivo, el proceso de montaje del arco se realizó abatiendo los dos semiarcos construidos verticales, empleando como elemento de retenida tirantes anclados en ambos estribos. La secuencia de la operación fue la siguiente:

- Los semiarcos se fabrican en taller en dos segmentos que se unen en obra en posición vertical sobre articulaciones provisionales metálicas. Su posición es ligeramente vencida, considerando en esta situación el peso del semiarco más el de los cables, de manera que el centro de gravedad del semiarco supera la vertical de la rótula de giro. La estabilización se consigue por medio de una torreta auxiliar de unos 10 m que se dimensiona para garantizar la estabilidad del semiarco de 50 m hasta el momento de su abatimiento (cargas de viento, cargas iniciales en tirantes...).
- La rotura del equilibrio para iniciar el abatimiento se consigue actuando sobre pares de gatos colocados en la parte superior de la torreta. Los tirantes de retenida se anclan en un marco giratorio que lleva alojada en su interior la unidad hidráulica de retenida. El anclaje de los tirantes en los semiarcos se realiza en rótulas provisionales.



Figura 21 Abatimiento del arco.



Figura 22. Puente sobre el río Galindo.



Figura 23. Arriostramiento transversal del arco.

- En las rótulas provisionales inferiores se dispone un sistema de control y corrección de los desplazamientos de las rótulas de giro del arco por medio de gatos hidráulicos. Actuando sobre estos se va progresivamente liberando cable para producir el abatimiento de los semiarcos, hasta que se encuentran enfrentados en clave, donde se bloquean con un empotramiento provisional atornillado (Figura 21).

## PUENTE SOBRE EL RÍO GALINDO (2007)

Este puente se dispone sobre el río Galindo en su desembocadura en la ría del Nervión, con una cierta oblicuidad, y salta de una manera limpia sobre el río y sus paseos laterales sin

apoyos intermedios. El trazado es muy curvo, en planta, con un radio de 250 metros, un peralte del 5% y una pendiente del 3%. El puente tiene una anchura de 27 metros con mediana y dos aceras en los bordes, de seis metros en el borde exterior y sólo metro y medio en el interior.

La solución elegida es un arco de 110 metros de luz y 16 metros de flecha con tablero inferior. Es el primer arco espacial, curvo en alzado y curvo en planta, que existe en el mundo con una estructura de gran tamaño. Para contrarrestar las cargas horizontales transversales del arco, debidas a su curvatura en planta, se disponen tirantes casi horizontales anclados en ménsulas que salen del borde interior del tablero. De esta forma, las cargas transversales se transforman en torsión en el tablero inferior (Figura 22).

No existe un solo elemento en el puente, si descontamos la cubierta sobre el paso de peatones, que no responda a una estricta exigencia resistente. Se ha convertido un sofisticado problema resistente en una forma exterior hermosa y nueva.

El puente está biapoyado en dos estribos, es muy curvo en planta y está constituido por un dintel metálico y un arco también metálico espacial, no contenido en un plano. El dintel tiene 2 m de canto y 27,0 m de ancho, con bordes claramente curvos. La acera de 6 m de anchura se cubre con una marquesina de acero y meta-crilato, no resistente. En la acera opuesta se disponen las costillas que soportan los tirantes transversales que sostienen lateralmente el arco (Figura 23).

El dintel es totalmente metálico con espesores de chapa de 15, 20 y hasta 30 mm, distribuidos en su contorno, según las exigencias resistentes. Está rigidizado longitudinal y transversalmente. Transversalmente con diafragmas dispuestos cada 4,4 m, y longitudinalmente con canales para la chapa superior y dobles T para chapa inferior.

El arco tiene un perfil parabólico de 2° grado en alzado y la planta sigue la directriz correspondiente al tablero. Está formado por dos tubos de 1.219 mm de diámetro y 50,8 mm. de espesor, y están unidos en la parte superior e inferior por chapas horizontales de 50 mm de espesor.

La unión del arco con el tablero, en su empotramiento, se realiza por intermedio de cuatro chapas longitudinales, dos por arco, de 80 mm y 90 mm (Figura 24).

La unión del arco con los tirantes transversales y las péndolas verticales se realiza por medio de unas chapas transversales de 30 mm de espesor que cortan totalmente los arcos y enlazan, por un lado, con las péndolas verticales, tubos circulares de 193,7 x 19; y, por otro, con los tirantes transversales activos, formados por cables cerrados de 83 mm de diámetro. La unión de los elementos de arco con estas chapas transversales debe hacerse a penetración completa. Los arcos son tramos rectos entre las chapas verticales, con lo que su ejecución se simplifica mucho (Figura 25).

La construcción se hizo mediante cuatro apoyos provisionales cimentados por pilotes también provisionales en el río. La sección del tablero se dividió en trozos de 22 m de longitud



Figura 24. Vista inferior del arco y la marquesina que cubre el paso de peatones.

y 5 m de anchura que se montaron sobre los estribos y apoyos provisionales mediante grúas. Se aprovechó el tablero ya soldado para avanzar con las piezas siguientes.

El arco también se montó sobre cuatro torres provisionales en la misma vertical de los apoyos sobre el río. Las piezas se colocaron mediante grúas y después se soldaron a la pieza anterior.

La puesta en carga de los tirantes pseudo-horizontales se realizó de forma gradual en tres pasadas desde los extremos hacia el centro; hacia el final de la operación se produjo el desapeo del puente. Las péndolas verticales se pusieron en carga por deformación, conforme se iban eliminando los apeos de las pilas provisionales y entrando en carga los tirantes activos.



Figura 25. Vista general del puente sobre el río Galindo.



Figura 26. Puente sobre el río Ebro en Logroño.

versal al arco, y por tanto, una flecha vertical importante en las pasarelas. Sin embargo, esta rigidización transversal del arco no fue suficiente. Los 4 últimos tirantes, que por cada extremo relacionan las pasarelas con el arco, están anclados al estribo, y así le confieren al arco el complemento de rigidez transversal necesario (Figura 28).

El puente se construyó empujando el dintel metálico central sobre pilas provisionales instaladas en el río, para hormigonar a continuación la losa superior. Posteriormente, se procedió al montaje desde el tablero central de las pasarelas exteriores.

En el borde exterior cóncavo del tablero, se dispone una marquesina de 8,19 m de voladizo que soporta un techo transparente de metacrilato liso.

## PUENTE SOBRE EL RÍO EBRO EN LOGROÑO (2002)

El puente de Logroño cruza el río Ebro en la propia ciudad. Este hecho ha propiciado dos cosas: la instalación de amplias aceras y el diseño de una configuración resistente y formal nueva. Para obtener esta última condición, separamos las aceras del cuerpo central del puente, con lo que conseguimos varias ventajas: reducir el ruido del tráfico en los peatones, crear una estructura espacial constituida por los tirantes que soportan las pasarelas por sus bordes interiores... (Figura 26).

En el puente de Logroño solo se separan las aceras; la calzada sigue recta. El puente tiene 140 m de luz. El tablero, para el peso del tráfico, está constituido por una viga mixta de sección trapezoidal de 2,0 m de canto y 18,6 m de anchura. Los tableros laterales que soportan las pasarelas tienen una sección metálica de 4,00 m de anchura superior, 2 m de anchura inferior y 1,1 m de canto (Figura 27).

El arco se divide en dos tubos de 1,2 m de diámetro, que se separan entre sí para conseguir resistencia a flexión fuera del plano, necesaria cuando una pasarela está cargada y otra no, lo que produce una gran deformación trans-



Figura 27. El puente sobre el río Ebro en Logroño tiene una luz de 140 m.



Figura 28. Los cuatro últimos tirantes del puente de Logroño están anclados al estribo.

## PASARELA SOBRE EL RÍO EBRO EN LA EXPO DE ZARAGOZA (2008)

Las pasarelas atirantadas son especialmente espectaculares a precios razonables, para su utilización con luces muy grandes, (141 m y 94 m en nuestro caso). Son, además, especialmente adecuadas para adoptar disposiciones rectas y curvas en planta y controlar el juego geométrico que se puede obtener con los tirantes. Cuando la planta de la pasarela es curva y la pila inclinada, como este caso, el resultado formal y estético resultante es muy atractivo. Este efecto se potencia por la noche con una iluminación dispuesta en la dirección de los tirantes y de las pilas, lo que da lugar a una cortina de luz muy hermosa. Combinado esto con una iluminación adecuada del suelo y la utilización de un color atractivo para los tirantes y las pilas, resulta un efecto deslumbrante, muy adecuado para casos como el presente (Figura 29).

La planta adoptada para la pasarela es curva y la anchura sólo es de 4,5 m., y además es atirantada desde una pila intermedia, situada en el borde del río. La longitud desarrollada de la pasarela es de 235 metros, 141 metros sobre el cauce y 94 en el vano de avenidas. El eje es curvo de radio 230 metros los primeros 188 metros desde el estribo 1, y recto en los 47 metros restantes, cercanos a la margen izquierda. Esta desviación del trazado original de radio constante es necesaria para que los tirantes próximos al estribo 2 no invadan la zona de tránsito de peatones (Figura 30).

Presenta una serie de características específicas.

- El dintel es totalmente metálico, tiene 4,5 m de anchura y 1 m de canto. La losa superior es metálica, en este caso en un solo plano horizontal, y la inferior curva de radio 3 metros. Los espesores de estas chapas son moderados, variando



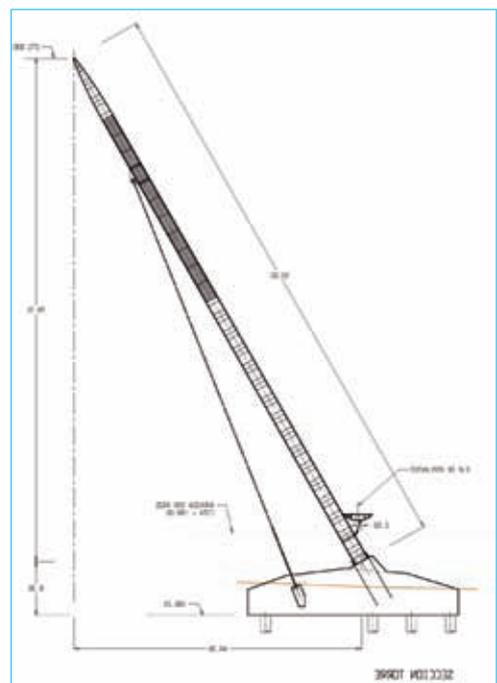
Figura 29. Pasarela sobre el río Ebro en Zaragoza.

entre 12 y 15 mm en el vano de 94 metros, y llegando a 30 mm en el vano sobre el río, salvo en los 5,90 metros próximos a los estribos que los espesores son considerables, llegando a 50 mm. La celda exterior del lado de los tirantes es necesario rigidizarla, quedando dividida en dos partes por una chapa horizontal de 16 mm de espesor. Tanto la chapa superior como la inferior se rigidizan longitudinalmente con perfiles en T.

- El dintel cuelga de la torre de un solo borde y ese borde es el interior, de manera que la visión del usuario sobre la expo 2008 no presenta el obstáculo de la presencia de los tirantes.



Figura 30. Pasarela sobre el río Ebro en la Expo de Zaragoza. Vista aérea.



Comprometidos con  
**La sostenibilidad**



**Construcciones y Obras Llorente, S.A.**

C/ Aluminio, 17 - 47012 Valladolid. Tel: 983 218 191

**LLORENTE**  
CORPORACIÓN

Pº de la Castellana, 137. Planta 14 - 28046 Madrid. Tel: 915 672 548

[www.corporacionllorente.es](http://www.corporacionllorente.es)





Figura 31. Vista inferior del dintel.

- El problema resistente que presenta colgarlo desde un solo borde se resuelve por la planta curva del dintel que transforma la torsión en flexión.
- La pila es inclinada. Tiene 90 m de longitud, 78,3 m de altura respecto a su empotramiento en el cimiento y 30° de inclinación respecto a la vertical. Su sección es circular de radio variable, desde 1,1 m en su empotramiento en la base hasta 0,9 m a 79,5 m se distancia respecto al empotramiento. Desde este punto hasta la parte superior, a 90 m de distancia, el diámetro disminuye hasta hacerse nulo. El espesor de las chapas varía desde 40mm en el cuerpo principal.

## PUENTE PRÍNCIPE DE VIANA SOBRE EL RÍO SEGRE EN LLEIDA (2010)

Se trata de una solución atirantada –atirantamiento extra-dorsal- formada por tres vanos de 35,85 m +86,00 m +75,00 m, dando una longitud total de 196,85 m (Figura 32).

La anchura útil de la plataforma está constituida por dos aceras laterales de 4,00 m y dos calzadas centrales de 6,6 m, determinando una anchura útil de 21,2 m y una total de 22,70 m.

El tramo principal, atirantado, tiene una longitud de 161,0 m (86,0 m+75,0 m) y el tramo secundario, sobre la Avda. del Segre, es una losa de 35,85 m x 22,70 m.

El tramo principal está formado por una viga cajón con un alma central y tiene forma de “U”, con el borde inferior curvo con una anchura de las tres almas de 0,30 m y la altura del alma central de 2,13 m. Inicialmente, esta viga cajón se constituía

por dos vigas en “V” prefabricadas que, al unir las, daba la forma total. La escasa longitud de estas vigas aconsejó a la constructora pedir su sustitución por una viga cajón “in situ”.

A esta viga se le adosan unas placas transversales rectangulares, aligeradas, de 3,00 m de anchura y 0,40 m de espesor, que tienen unos nervios laterales de 30 cm, que forman, al estar unidas entre sí, nervios de 60 x 40 cm.

Sobre este conjunto se disponen prelosas de 7 cm de espesor y sobre ellas se realiza el hormigonado de una losa “in situ” de 20 cm de espesor (Figura 33).

La pila está formada por cuatro brazos abiertos: de dos de ellos, los principales, cuelga el tablero, y en los otros dos, se apoya. Los principales son prefabricados y los otros dos se construyen “in situ” Figura 32.

La cimentación de esta pila es una zapata de 21,00 m x 9,00 m x 3,00 m.

La altura vertical de las pilas inclinadas que sostienen los tirantes es de 38,6 m. Su sección transversal varía desde una sección rectangular de 2,4 m x 3,00 m a una sección formada por dos rectángulos de 2,4 m x 2,0 m y 0,4 m x 1,2 m. Este segundo rectángulo tiene como misión aligerar visualmente la pila en dirección frontal.

En la parte superior aparece una cabeza de unos 8,75 m de altura y anchuras variables entre 3,8 m y 4,8 m, con un incremento de anchura para el alojamiento de los cables con una curvatura adecuada.



Figura 32. Puente Príncipe de Viana.

Los tirantes están formados por 12 torones de 0,6" de diámetro, los números 5 al 15; por 14 torones los números 2 a 4; y por 16 torones el número 1, que va al estribo. Estos tirantes son pasantes a través de la pila, determinando unos radios de curvatura de entre 3,25 y 6,05 m. El tirante queda anclado en la pila por rozamiento y adherencia sobre la vaina metálica que utiliza para atravesar la pila.

Se disponen excéntricos a la pila, del lado interior, para compensar la flexión hacia fuera de la misma (Figura 34).

El encuentro de las vainas de los tirantes con la torre se realiza mediante una unión telescópica, pero que evita los movimientos relativos de la torre y los tirantes. El encuentro de los tirantes con el tablero necesita de un armado especial para poder recoger los esfuerzos múltiples que se presentan en esta zona.

Los brazos cortos que apoyan al dintel tienen una longitud de 17,16 m y unas dimensiones inferiores de 3,6 m x 1,3 m y superior de 5,1 m x 0,93 m.

El dintel dispone a lo largo de toda su longitud de una imposta de forma quebrada, barandilla y defensas, así como sendas juntas de dilatación.

Las aceras están perforadas con tubos para alojar conducciones. Todo el puente está pintado de color blanco, excepto la zona interior entre las costillas y la viga principal, que es de color azul oscuro.

El cálculo del proceso constructivo se realiza sobre un modelo evolutivo que nos proporciona los diferentes esfuerzos por los que van pasando todos los elementos de la estructura en las diferentes fases de construcción, hasta llegar a la estructura completa.

Sobre ésta se colocan todos los elementos que componen la carga muerta: aceras, asfalto, defensas, barandillas, impostas, etc.

### **PUENTE SOBRE EL RÍO DANUBIO ENTRE VIDÍN, BULGARIA, Y CALAFAT, RUMANIA (2012)**

El puente principal sobre el río Danubio tiene una longitud total de 1.391 m. Lo forman tres



Figura 33. Vista inferior del tablero del Puente Príncipe de Viana.

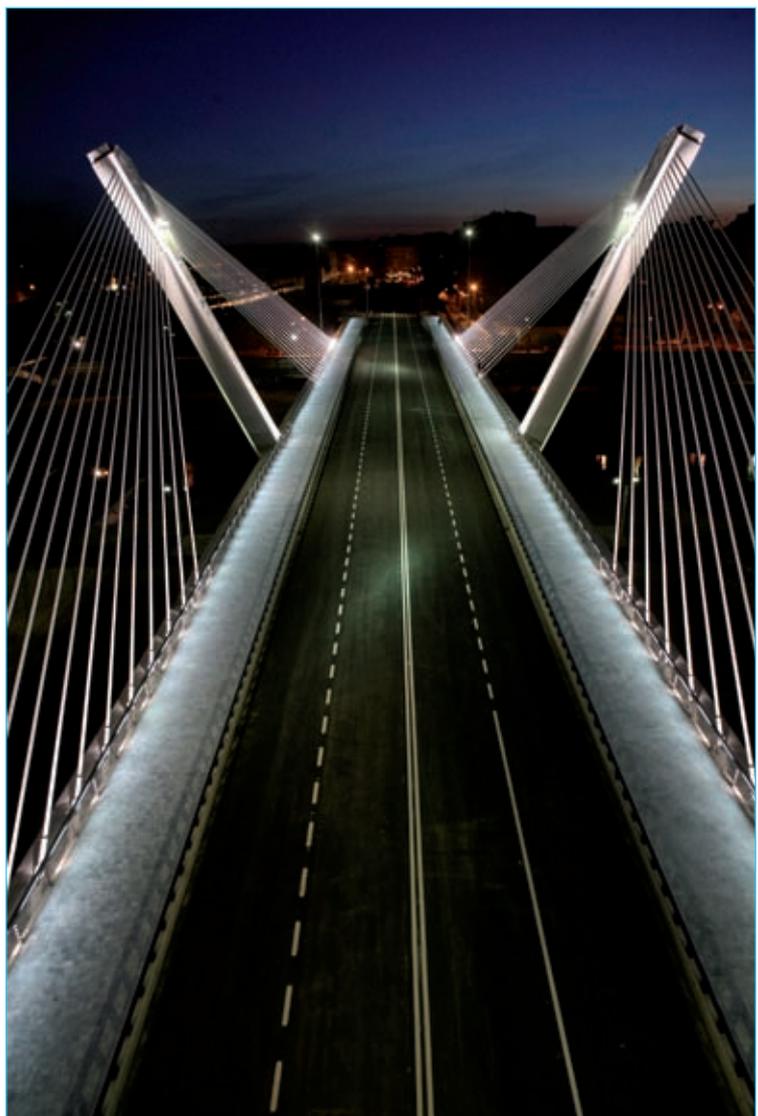


Figura 34. Vista del puente por el eje.

tipos de tableros dependiendo de la longitud del vano. El puente de carretera tiene 80 m y 180 m, sobre la zona no navegable del río; y 180 m de luz la zona navegable del río. El de ferrocarril tiene 40 m de luz con apoyos intermedios a cuartos de luz del puente de carretera de 80 m. La distribución de vanos es: 52,0 + 7x80,0 + 124,0 + 3x180,0 + 115,0 m. El tablero es un cajón único con puntales transversales de hormigón pretensado. El cajón tiene un canto de 4,50 m y un ancho de 31,35 m (Figura 35).

La sección transversal cumple los requerimientos de proyecto. Consta de dos calzadas independientes de 7,50 m de ancho con dos carriles cada una. En la parte derecha hay una acera para peatones y bicicletas de 2,50 m de ancho, mientras que en el lado izquierdo tiene 0,75 m, con sitio adicional para la colocación de señalización, electrificación y mantenimiento. Se disponen varias barreras para preservar las condiciones de seguridad.

El cajón único tiene una losa inferior de ancho 7,20 m y espesor variable de entre 0,45 m a 0,75 m. Las almas tienen un ancho de 0,50 m que aumenta hasta 1,30 m sobre las pilas. Para completar la sección transversal, hay dos familias de puntales transversales inclinados para apoyar los voladizos de la losa superior, situados cada 4,30 m en los vanos de 80 m, y cada 4.186 m en los vanos de 180 m.

La construcción del cajón central del tablero de 180 m. se realiza por voladizos sucesivos atirantados con dovelas prefabricadas de 4.186 m, izadas desde el río con un carro de avance. El resto de la sección transversal se hormigona "in situ" con un carro especial rodando sobre el dintel (Figura 36).

Los vanos de 80 m se construyen por avance en voladizo con viga de lanzamiento. Las dovelas tienen 2,15 m.

El sistema de tirantes se ha proyectado como extradorado, requiriendo una importante reducción en las oscilaciones de tensión debido a las sobrecargas. Para ello, se ha diseñado:



Figura 35. Vanos de 180 m de luz sobre la zona navegable del río Danubio.

- Pequeña altura de pilas de alrededor de 1/10 del vano, esto es, unos 19 m de altura para un vano de 180 m.
- Un tablero de elevada rigidez: el canto del tablero, de 4,50 m, es considerable cuando se compara con disposiciones clásicas de puentes atirantados. Por ejemplo, el puente sobre la Bahía de Cádiz tiene un canto de 3,00 m para una luz de 540 m.
- Se han considerado dos opciones para limitar la oscilación de tensiones en los cables, canto variable del tablero o puntales longitudinales. La segunda es mucho más efectiva.
- Sillas en los pilonos para el paso del sistema de atirantamiento.
- Tirantes de pequeña longitud, siendo la máxima de 90 m.

Esta reducción del rango de tensiones incrementa la capacidad de los cables ante la fatiga. Se pueden uti-



Figura 36. Construcción en avance en voladizo con dovelas prefabricadas.



Figura 37. Puente sobre la Bahía de Cádiz.

lizar los sistemas de pretensado exterior y las sillas de acero especiales, pero sencillas en la parte superior de los pilonos.

Estas especificaciones reducen los costes tanto para la construcción como para el mantenimiento. Los tubos de acero de la silla se han diseñado para permitir la sustitución de cada cable, en caso de ser necesario.

Para proteger las pilas frente al impacto de barcos se ha proyectado un emparrillado formado por piezas verticales prefabricadas con agujeros, para alojar vigas horizontales hormigonadas "in situ" que dan continuidad a las piezas prefabricadas. El encepado está situado por encima de la cota máxima del nivel del río en situación de emergencia, 36,60 m. Las cimentaciones han sido diseñadas para resistir el impacto de fuerzas de acuerdo al Eurocódigo 1, parte 7.

El viaducto de acceso del ferrocarril tiene una longitud total de 400 m. La distribución de vanos es de 32,0+9x40,0+8 m. Es un puente que cruza la carretera en el terraplén para alcanzar el eje central de la sección transversal del puente principal.

El tablero es una viga doble con una losa transversal de hormigón pretensado. Las vigas tienen sección rectangular maciza de canto 1,90 m y ancho 1,0 m. La losa es de espesor 0,25 m. El ancho total es de 8,60 m. La sección transversal cumple los requisitos de las bases de proyecto: el ferrocarril con un ancho de 6,0 m, dos caminos laterales de mantenimiento de 0,75 m y 0,80 m para la electrificación. El tablero se construye vano a vano con una cimbra apoyada en el suelo. Tanto el pretensado como la armadura pasiva se han adaptado a este tipo de construcción.

## PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CÁDIZ (2014)

El puente, propiamente dicho, se puede dividir en cuatro tramos distintos dependiendo de sus diferentes características funcionales (Figura 37).

La longitud total del puente es de 3.082 m. Es, con mucha diferencia, el mayor puente de España y uno de los mayores puentes del mundo.

El dintel tiene 34,3 m de anchura, correspondientes a cuatro carriles de circulación, dos en cada dirección, de 3,5 m de anchura, dos vías de tranvía y a los arcones, defensas, alojamiento de los tirantes y pantallas para proteger el tráfico del viento, necesarios para la perfecta funcionalidad del puente.

La estructura de este dintel debe ser ligera, aerodinámica y esbelta, por tanto, de estructura mixta, acero y hormigón de 3,00 m de canto y bordes perfectamente perfilados.



Figura 38. Tramo Viaducto de acceso a Cádiz. Puente sobre la Bahía.



Figura 39. Construcción del Tramo Viaducto de acceso a Cádiz. Puente sobre la Bahía de Cádiz.



Figura 40. Construcción del Tramo Viaducto de acceso a Cádiz. Puente sobre la Bahía de Cádiz.

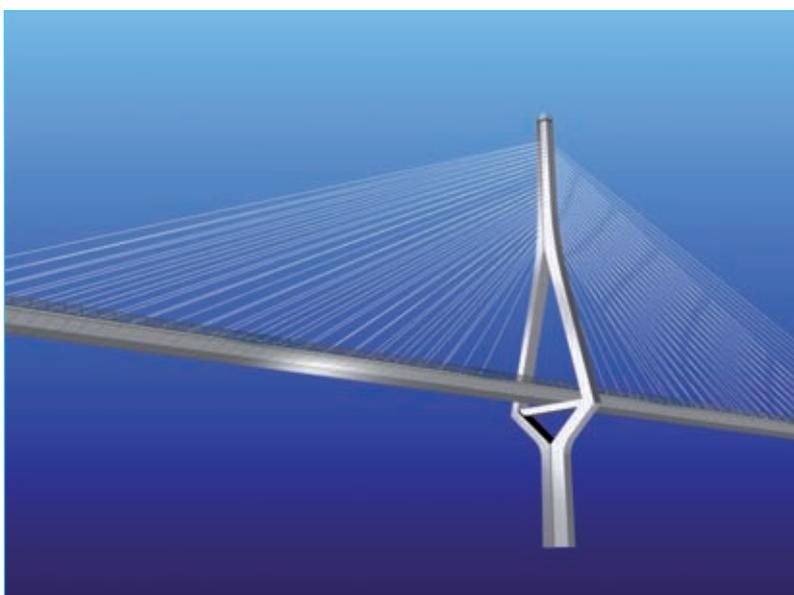


Figura 41. Tramo principal. Puente sobre la Bahía de Cádiz. Imagen virtual.

El Tramo Viaducto de acceso al lado de Cádiz, corresponde al acceso al tramo principal, desde el lado Cádiz. Tiene una longitud de 570 m. Es un tramo empujado desde la capital gaditana hasta el puente desmontable (Figuras 38, 39 y 40).

El Tramo Desmontable tiene una longitud de 150 m.

El Tramo Principal es el puente atirantado situado sobre el Canal de Navegación y sus compensaciones atirantadas. Tiene una longitud de 1.180 m.

Su construcción se realizará por avance en voladizo, el dintel se divide en dovelas de 20,00 m de longitud, que se montarán en el Muelle de la Cabezuela y se llevarán por flotación hasta el puente, donde serán izadas por medio de carros-grúa móviles situados en la punta delantera de los voladizos (Figuras 41 y 42).

Una vez izadas, se procederá a su soldadura con el tramo ya construido y al atirantamiento desde la torre. Inmediatamente, se procederá al armado y el hormigonado de la losa superior y retesado de los tirantes.

El Tramo Viaducto de acceso al lado de Puerto Real corresponde al acceso al tramo principal desde esta localidad, con una longitud de 1.182 m.

Se puede dividir en tres subtramos. El subtramo junto al puente atirantado está formado por tres vanos de 75 m de luz, cuya sección transversal es idéntica a la del acceso al lado Cádiz, de pero en este caso, de hormigón pretensado. Las pilas son idénticas a este acceso (Figura 43).

El segundo subtramo está constituido por los siguientes vanos: 75,0 m+68,0 m+4 m +62,0 m+54,0 m.

La razón de ser de este segundo subtramo es la presencia de circulación axial bajo el puente y la presencia de acceso a las factorías existentes que se desarrollan a lo largo del vial, lo que ha obligado a diseñar unas pilas en forma

de pórtico, con una luz libre entre soportes de 13,5 m. La forma de todos los elementos responde al diseño general de las pilas. El doble trapecio, que es la forma general de las pilas tipo, se separa en este caso, con un trapecio para cada una de las pilas del pórtico, las cuales tienen una base mayor de 3,2 m, una menor de 2,9 m y un canto de 3 m (Figura 44).

Estas pilas se cierran en la parte superior para destacar dos apoyos como en el resto de los vanos. La altura de estas pilas es variable, de entre 13 m y 34 m.

El dintel es exactamente igual que el del subtramo ya descrito.

El tercer subtramo, junto al estribo 2, el de Puerto Real, cambia. Cambia la luz a 40 m, la típica, y 32 m la del estribo, dado que la altura de las pilas desciende radicalmente al aproximarse al estribo.

La construcción del tramo de acceso de Puerto Real se realizará tramo a tramo, con cortes situados a cuartos de la luz y apoyado sobre cimbra en el suelo.

Las pilas, únicas para toda la anchura, tienen forma variable, pero única para todas las pilas, cualquiera que sea su altura, que varía entre 8 m y 52,5 m. En forma de doble rombo tiene 10,5 m en la base de la pila más alta para terminar en 4,2 m en la "cintura", de donde se abre la cabeza que vuelve a tener 10,5 m de anchura. La dimensión transversal es de 4 m en el centro y 2,9 m en el borde. Su superficie es, por tanto, alabeada. 



Figura 42. Tramo principal. Puente sobre la Bahía de Cádiz. Imagen virtual y construcción.

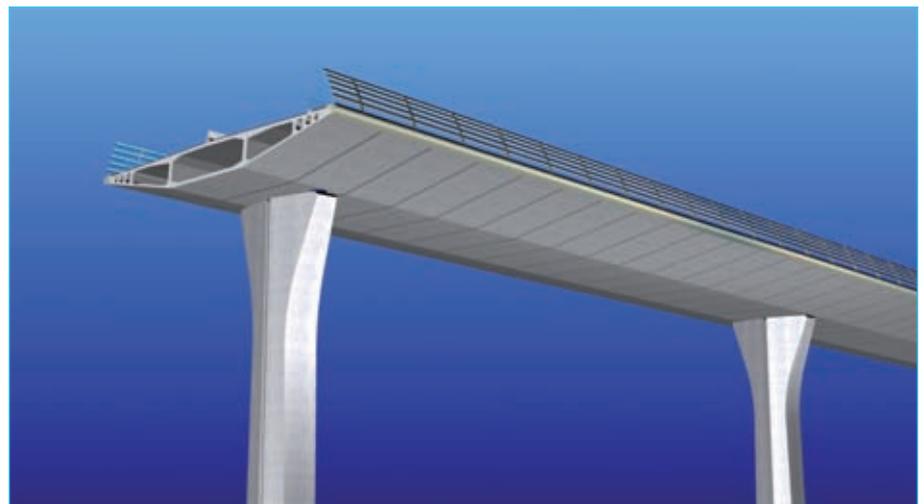


Figura 43. Detalle de las pilas. Primer subtramo del Tramo Viaducto de acceso a Puerto Real. Puente sobre la Bahía de Cádiz.

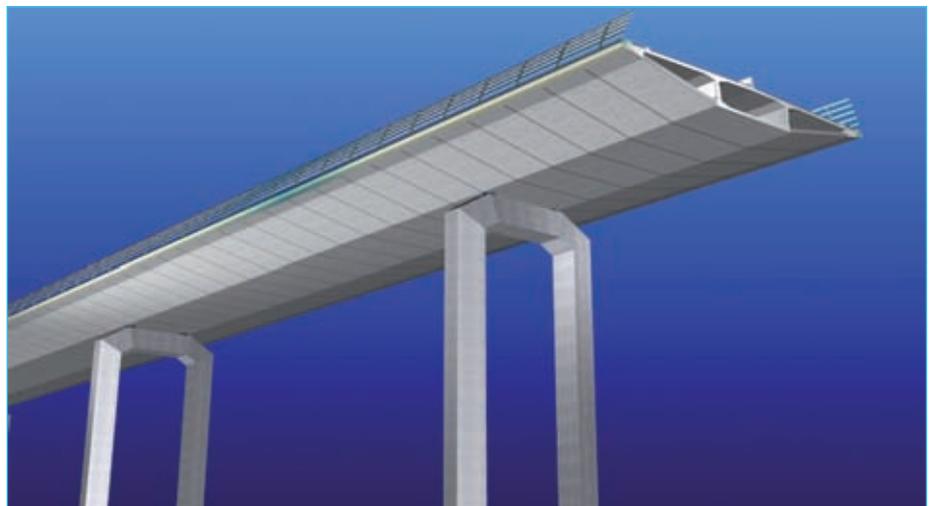


Figura 44. Detalle de las pilas. Segundo subtramo del Tramo Viaducto de acceso a Puerto Real. Puente sobre la Bahía de Cádiz.

# La evolución de los nudos viarios en España. Una guía para el diseño de nudos viarios

Sandro ROCCI

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

*Catedrático de Universidad (jubilado) - Profesor Emérito*

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*

*Universidad Politécnica de Madrid*

## RESUMEN

*Se repasa la normativa estatal española sobre nudos viarios, desde los años sesenta del pasado siglo hasta hoy, la cual ha sido escasa para el gran desarrollo que ha habido en ese período en construcción de carreteras. Se describe cómo se ha desarrollado la “Guía de nudos viarios”, publicada por una Orden Circular de la Dirección General de Carreteras en diciembre de 2012, una publicación técnica de considerable envergadura. El autor de este artículo ha actuado como ponente de su redacción.*

*Se describe el espíritu que anima el texto de esta nueva Guía, matizando el grado de obligatoriedad de cada uno de sus párrafos, y se destaca la importancia de la explotación, de los factores humanos y de las ayudas a la conducción, las cuales deben ser tenidas en cuenta desde la concepción del nudo. Como criterios de diseño se han empleado dos niveles de servicio y siete vehículos patrón.*

*Se ha tenido en cuenta detalladamente el funcionamiento de los nudos, incluyendo las interacciones entre los contiguos y las necesidades de los usuarios especiales (vehículos pesados, usuarios vulnerables y transporte colectivo). A partir de una labor analítica, se ha sintetizado un conjunto de configuraciones funcionalmente posibles, y se ha establecido una metodología para seleccionar el nudo más conveniente en un caso concreto. Se describen también algunas particularidades de la Guía que resultan especialmente novedosas*

*Palabras clave: Trazado, Intersección, Enlace, Glorieta, Semáforo*

## ANTECEDENTES

Aunque parezca mentira, hasta hace cinco meses una gran parte de las publicaciones de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento sobre nudos viarios se remontaba a hace más de cuatro décadas, cuando la denominación de ese centro directivo incluía también a los caminos vecinales y dependía del Ministerio de Obras Públicas:

- En 1962 se publicó, mediante una Orden Circular<sup>(1)</sup>, una norma técnica en la que se recogían los detalles del trazado de los elementos de una intersección.
- En noviembre de 1965 y con motivo del II Seminario de Tráfico, se publicó una serie de ejemplos de intersecciones.
- En enero de 1967 se puso al día esa documentación, plasmándola en unas Recomendaciones<sup>(2)</sup> para el pro-

yecto de intersecciones, de las que se hizo una segunda edición<sup>(iii)</sup> en 1975.

- En 1968 se publicaron unas Recomendaciones para el proyecto de enlaces<sup>(iv)</sup>.

Esos documentos eran una afortunada traducción de otros análogos de la AASHO<sup>(a)</sup> norteamericana y con ellos (y con su ingenio), los ingenieros españoles han proyectado y construido los abundantes y variados nudos viarios de nuestra red. Pero no es de extrañar que muchos los considerasen anticuados.

Bien es cierto que, ante el nuevo fenómeno de las glorietas, en 1989 aparecieron unas Recomendaciones sobre glorietas<sup>(v)</sup>, que eran una versión que hicimos Mariano Gullón y yo de las equivalentes inglesas, y que daban un marco técnico a un tipo de nudo que, desde entonces, ha conocido un gran auge.

Sobre estos temas vinieron a incidir también:

- La Norma 8.2-IC "Marcas viales"<sup>(vi)</sup>.
- La regulación de los accesos a las carreteras del Estado, las vías de servicio y la construcción de instalaciones de servicios de carreteras<sup>(vii)</sup>, aprobada por una Orden Ministerial de 1997, que incidía en diversos aspectos relacionados con los nudos, concretamente en la separación mínima de las conexiones (entradas y salidas) y en la ordenación de los movimientos de cruce en una carretera convencional.
- La Norma 8.1-IC "Señalización vertical"<sup>(viii)</sup>.

Los diversos borradores que revisaron a principios de los años 90 la Instrucción 3.1-IC "Características geométricas. Trazado", aprobada por Orden Ministerial de 23 de abril de 1964, y la Norma complementaria de la 3.1-IC "Trazado de autopistas"<sup>(ix)</sup>, trataron más modernamente el problema del proyecto de los nudos. Por último, al revisarse definitivamente<sup>(x)</sup> esa norma fundamental en 1999, se modificó la normativa relativa a ciertos elementos de los nudos viarios, como los carriles de cambio de velocidad, y sus autores decidieron incluir en ella un breve capítulo (el 8) relativo a los nudos, en el que sólo se esbozan unos conceptos generales y algunas prescripciones básicas. Únicamente se tomaron algunas decisiones relativas a:

- El tipo de los nudos: En las carreteras con calzadas separadas sólo se emplearían enlaces; en las carrete-

ras convencionales se determinaría el tipo basándose en un estudio específico.

- Las conexiones en los ramales y vías de giro: Solo se permitía conectar en ellos otros ramales y vías de giro, pero no vías colectoras - distribuidoras, ni mucho menos vías de servicio.
- La separación entre los accesos (entradas y salidas), en la línea preconizada por la regulación de accesos aprobada por la Orden Ministerial de 1997, con la que, sin embargo, había algunas contradicciones.

Así que se dejó claramente para otro documento la normativa específica relativa a los nudos viarios. Al estar incluido en una norma de elevado rango, el texto de la 3.1-IC resultaría muy vinculante para documentos posteriores cuyo rango fuera menor. Afortunadamente, el apartado 1.2 de la Norma permite que, excepcionalmente, se admitan cambios en sus criterios, manteniendo en todo caso las condiciones debidas de seguridad vial, pero sin incurrir en costes desproporcionados. Esto ocurre especialmente en las vías urbanas, en las carreteras de montaña, en las carreteras que discurren por espacios naturales de elevado interés ambiental o acusada fragilidad, y en las mejoras locales de carreteras existentes.

Queda, por tanto, bastante claro que la Norma 3.1-IC se refiere básica, aunque no exclusivamente, a vías interurbanas de nuevo trazado, situadas en un entorno en el que la densidad de población es pequeña y, por consiguiente, también lo son las restricciones del espacio disponible, los condicionantes urbanísticos incluidos en figuras aprobadas de planeamiento y los correspondientes a la demanda del tráfico.

Así las cosas, a finales de 1998 la Dirección General de Carreteras convocó un concurso abierto de consultoría y asistencia para redactar una Guía para el proyecto de los nudos viarios en la que se recogieran, de una forma sistemática, los conceptos aprovechables de los documentos anteriores, y se incorporasen las más modernas normas, preceptos, recomendaciones y sugerencias de la técnica para que el proyecto y posterior explotación de los nudos viarios proporcionasen unas infraestructuras económicas, seguras e integradas en el entorno.

Yo formé parte del equipo adjudicatario del concurso; una vez preparado un borrador de la Guía, éste se difundió entre las personas designadas por la Dirección General de Carreteras para formar parte de una Comisión que lo discutiera, ante la que actué de Ponente a lo largo de 50 reuniones en las cuales hubo muy animados debates. Tras

(a) American Association of State Highway Officials: Asociación Norteamericana de Funcionarios Estatales de Carreteras.



tener en cuenta las observaciones de los miembros de la Comisión, elaboré el texto definitivo de la Guía de nudos viarios, la cual se publicó el 14 de diciembre de 2012 por medio de la Orden Circular 32/2012 de la Dirección General de Carreteras; un nada baladí volumen de unas 550 páginas.

## ESPÍRITU DE LA GUÍA

La Guía para el proyecto de los nudos viarios es un documento completo mucho más didáctico de lo que sería una normativa. Ofrece orientaciones para proyectar nudos -tanto de nueva construcción como los que se acondicionen-, describe las posibilidades de resolver los problemas concretos de cada uno, y compendia lo más substancial de la materia.

Para ello, en el texto de la Guía conviven distintos textos con diferentes grados de obligatoriedad:

- Normas: reglas que se debe seguir en todo caso, salvo las excepciones definidas y previstas en ellas mismas.
- Directrices: instrucciones que se debe seguir, salvo una justificación suficiente en contrario.
- Recomendaciones: consejos no obligatorios que conviene seguir, por esperarse de ellos algún efecto favorable.
- Sugerencias: ideas comúnmente aceptadas que se puede seguir y de las que también se espera un efecto favorable.
- Posibilidades: ideas que se puede seguir a falta de otras mejores y de las que se sospecha que los efectos son favorables.
- Comentarios: escritos que sirven de explicación para que los conceptos se entiendan con más facilidad.

Se ha redactado la Guía asignando un papel muy destacado a la explotación de los nudos viarios, especialmente a la seguridad vial y la comprensión del diseño. Para ello, se han tenido en cuenta las características de los conductores y se han establecido criterios de sencillez, uniformidad y consistencia.

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La Guía tiene un cierto enfoque tridimensional, e incluye no sólo la disposición de los elementos viarios sino también sus efectos dinámicos en la explotación, es decir,

en el comportamiento de los conductores y demás usuarios. Esto no es tan directo como lo relacionado con el trazado de unos elementos en planta, en alzado o en sección; tiene más que ver con la comunicación entre el conductor, la vía y su nudo, cuyo fin principal es aclarar, simplificar, regular y facilitar la tarea de aquél.

Así pues, a los criterios habituales, se ha añadido otros resultantes de las investigaciones sobre los factores humanos, relacionados con las características y las expectativas de los conductores acerca del trazado de la vía, y con los dispositivos para el control de la circulación por ella. El diseño y la señalización de un nudo viario han de ser templados con los resultados de la experiencia en la explotación de nudos similares, y enfocados desde el punto de vista de los usuarios que por él vayan a transitar (forasteros o habituales, irritados o preocupados), quienes deben poder hacerlo con comodidad y fluidez, pero sobre todo, con seguridad, sin preocupaciones, dudas ni frustraciones. La percepción del nudo no tiene que dar lugar a vacilaciones ni falsas maniobras, ni siquiera por parte de los conductores no familiarizados con él; su tarea debe ser facilitada, si es correcta, y dificultada en caso contrario. Aun así, si se comete un error, el nudo debe ser "clemente" y no exigir un precio demasiado elevado por un instante de distracción o de indecisión.

Es preciso atraer la atención de los conductores hacia lo que se debe hacer, no hacia lo contrario. Quienes diseñen y señalicen los nudos deben simplificar la tarea de los conductores, en vez de complicársela en un entorno de por sí complejo. La ordenación de la circulación y, especialmente, la señalización han de ser tenidas en cuenta desde el principio del diseño, y no meramente añadidas al final. El diseño se debe dirigir a unos conductores no habituales y relativamente inexpertos, y tener en cuenta sus errores.

## CRITERIOS DE DISEÑO

En los elementos de un nudo viario se han distinguido dos niveles de servicio en el año horizonte:

- Un nivel normal o aceptable en la hora de diseño, en el que se puede garantizar a los conductores unas condiciones de circulación relativamente cómodas.
- Un nivel extraordinario en las horas punta, cuando la circulación por algunos elementos del nudo se puede volver inestable<sup>(a)</sup> y la probabilidad de un colapso generalizado es superior al 50%.

(a) Aunque permanezca estable la circulación por los tramos viarios, lejos del nudo.

Emulsionantes:

**ASFIER**

Activantes de adhesividad:

**ASCOTE**

Aditivos:

**PLASFALT**

AL SERVICIO DE LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

*Kao Corporation, S.A.*

Puig dels Tudons, 10

E-08210 Barberá del Vallés (Barcelona) Spain

Tel: +34/937399-300

Fax: +34/937399-377

e-mail: [marketing@kao.es](mailto:marketing@kao.es)



Se definen en la Guía siete tipos de vehículos-patrón, con sus dimensiones, maniobrabilidad y prestaciones, y su ámbito de aplicación. Se analizan también doce interacciones entre ellos: seis propias de los tramos viarios y otras seis específicas de los nudos.

## FUNCIONAMIENTO DE LOS NUDOS

La Guía analiza el funcionamiento de los nudos atendiendo a los siguientes aspectos:

- La ordenación de la circulación en los cruces, distinguiendo entre prioridad a la derecha, prioridad fija, prioridad secuencial, circulación giratoria y cruce a desnivel.
- El funcionamiento de las conexiones (entradas y salidas), bifurcaciones y confluencias: antes de ellas, en la zona perturbada por ellas y más allá de ellas.
- Las retenciones causadas en un ramal por la presencia de intersecciones al final del mismo.
- Los tramos de trenzado, de los que se distinguen tres tipos y se analizan tanto el funcionamiento como las posibilidades de su mejora.

Se relaciona la velocidad de diseño con la velocidad operativa, matizando el concepto de velocidad de proyecto recogido en la Norma 3.1-IC y manteniendo los de velocidad específica y velocidad de planeamiento. Como específico de los nudos, se trata el tema de la velocidad relativa de los vehículos en conflicto.

En el crucial tema de las interacciones entre nudos contiguos, que determina la distancia mínima entre ellos, se distingue entre autopistas / autovías y carreteras convencionales, y entre entornos urbanos e interurbanos.

Por último, se describen diversas medidas encaminadas a la acomodación de usuarios especiales (vehículos pesados, usuarios vulnerables y transporte colectivo).

## ANÁLISIS, SÍNTESIS Y SELECCIÓN

Se ha seguido en la Guía un método clásico de descripción de una realidad compleja como es la de los nudos viarios:

Primeramente, se han analizado todos los elementos que pueden entrar a formar parte de un nudo viario:

- Patas: número y disposición
- Movimientos posibles desde cada acceso:
  - ♦ De paso:
    - Trazado
    - Continuidad
    - Equilibrio en las conexiones
    - Cruces a desnivel
    - Velocidad
  - ♦ Giro a la derecha:
    - Configuración
    - Canalización
  - ♦ Giro a la izquierda:
    - Configuración
    - Carriles centrales de espera
- Trazado de los nudos:
  - ♦ En planta
  - ♦ En alzado
  - ♦ Coordinación planta - alzado
  - ♦ En sección
  - ♦ Márgenes
- Visibilidad
- Isletas
- Cuñas y carriles de cambio de velocidad
- Conexiones (salidas y entradas):
  - ♦ Definiciones
  - ♦ Emplazamiento
  - ♦ Lado
  - ♦ Número de carriles y configuraciones
  - ♦ Orden y distancias
- Bifurcaciones y confluencias
- Movimientos no permitidos
- Vías de servicio
- Vías colectoras – distribuidoras
- Sistemas de calzadas centrales y laterales
- Tratamientos de la mediana

Luego, se han combinado esos elementos en distintas morfologías, que no sólo se describen sino que se critican, exponiendo sus ventajas e inconvenientes con vistas a la selección de la más apropiada:

- Intersecciones de tres tramos con prioridad fija: en T, en Y



- Intersecciones de cuatro tramos con prioridad fija: en cruz, en X
- Glorietas: normales, miniglorietas, dobles, en pesa
- Intersecciones y glorietas reguladas por semáforos
- Enlaces de tres patas:
  - No direccionales: en trompa, semidireccionales
  - Direccionales
- Enlaces de cuatro patas:
  - Con una sola obra de paso: en diamante, en trébol parcial, en trébol completo
  - Con más de una obra de paso: glorietta a distinto nivel, en biela, en trébol modificado

El proceso de selección se complementa con un análisis funcional de las soluciones elegidas.

### ALGUNAS PARTICULARIDADES DE LA GUÍA

A continuación se citan algunas circunstancias frecuentes en la práctica española que la Guía ha abordado en aras de una mejor comprensión de los nudos por parte de los conductores, teniendo en cuenta un enfoque basado en la ingeniería de los sistemas viarios y en la comunicación entre la infraestructura y sus usuarios:

- La continuidad del itinerario. Una vía designada por un número o un nombre debe ser fácil de seguir a través del nudo, especialmente para los usuarios no familiarizados; estos problemas se plantean con frecuencia en las zonas peri-urbanas y tienen que ver con defectos en la jerarquización de la red viaria.
- El equilibrio del número de los carriles. En una salida o en una entrada no se debe perder o ganar más de un carril. Si la salida o la entrada, por la intensidad de su circulación, han de tener más de un carril, es preciso añadir carril(es) auxiliar(es) al tronco en una distancia bastante sustancial.

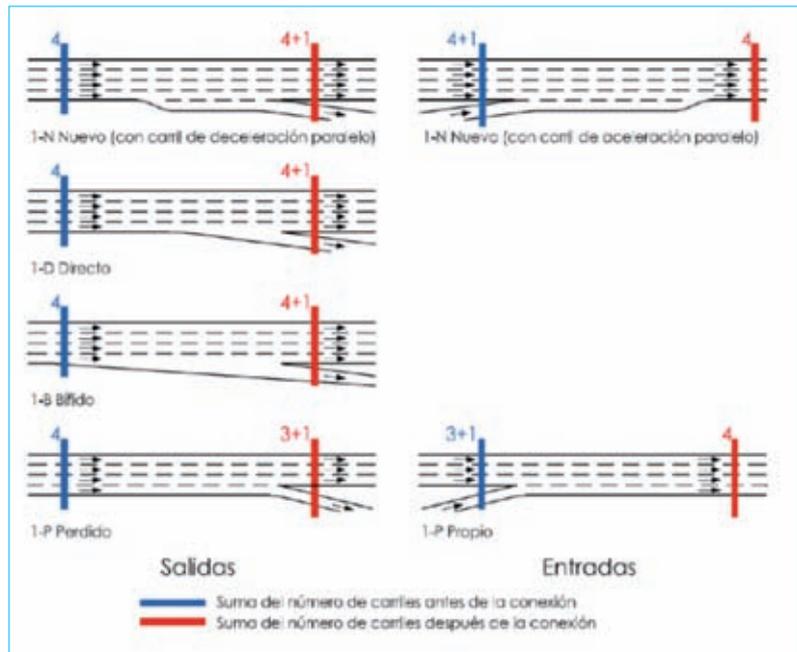


Fig. 1 Conexiones de un solo carril.

Además de las configuraciones habituales de salidas o entradas de un solo carril (Fig. 1), la Guía aborda las que tienen dos carriles por razones de capacidad (Fig. 2). El estudio abarca hasta la señalización vertical y horizontal que es específica para cada configuración.

La posición de las conexiones. La mayoría de los conductores no familiarizados con un nudo esperan encontrar una sola salida, situada antes de la vía que se cruza, y una sola entrada, situada después. La ubicación de una salida en una curva, en lugar de en una recta, va en detrimento de la seguridad.

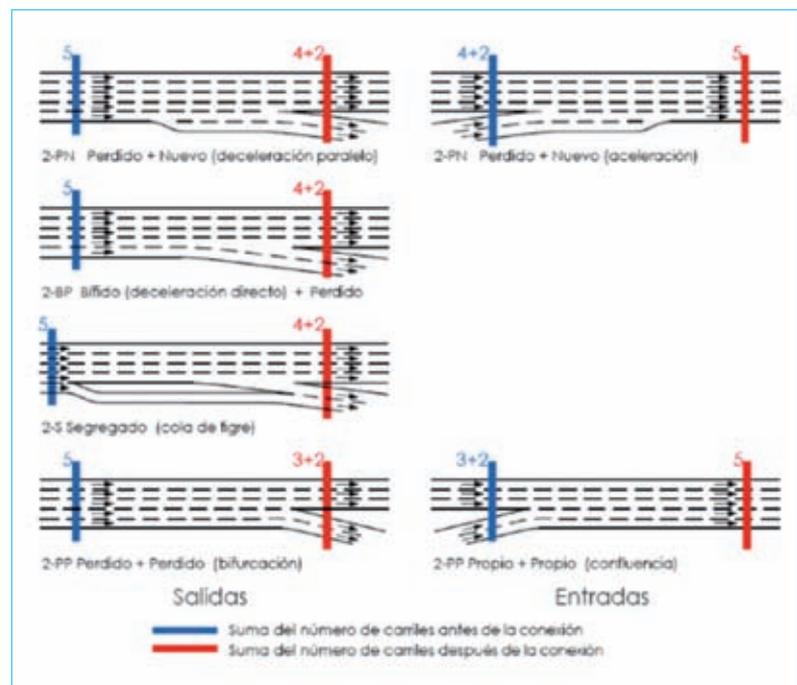


Fig. 2 Conexiones de dos carriles.

mento de la perceptibilidad de su presencia y de la comprensión de su función. Prolongando el ramal, aunque sea adosado al tronco, se puede llegar a situar la "nariz" en una alineación recta y antes del cruce, donde resulte perceptible desde una distancia suficiente y su función sea comprensible incluso para los conductores no habituales.

- El lado de las conexiones (entradas y salidas). Los conductores esperan que salgan o entren por la derecha unas corrientes de tráfico de menor importancia que la de paso. Las salidas o entradas por la izquierda son causa de un funcionamiento irregular y poco seguro, salvo que se trate de una bifurcación o de una confluencia.

- La separación entre las conexiones. Es preciso profundizar en el funcionamiento (en términos del nivel del servicio) de las distintas secuencias de conexiones que no se puedan considerar aisladas: dos salidas seguidas, dos entradas seguidas, una salida seguida de una entrada, o una entrada seguida de una salida. Es un tema que tiene muchas repercusiones, pues influye no sólo en la separación mínima entre dos nudos contiguos, sino también en que determinadas configuraciones de un nudo sólo se puedan abordar interponiendo unas vías colectoras - distribuidoras que eviten los movimientos de trenzado en el tronco. Este problema se puede dar fuera del tronco, en los ramales compartidos hacia o desde varios destinos, o en las propias vías colectoras - distribuidoras.

- La velocidad específica de los elementos del trazado, que debe tener en cuenta que en un nudo las velocidades de recorrido son muy distintas de las que se emplean en los tramos que en él se conectan.

- El punto de referencia del trazado en planta. En un nudo, la simplificación de que las trayectorias de los vehículos se hallan suficientemente representadas por el que se denomina "eje en planta" no proporciona ya una aproximación suficiente a las condiciones de su funcionamiento (Fig. 3). Son precisamente las trayectorias, referidas al centro del eje director del vehículo, las que deben adoptar las formas habituales de las alineaciones en planta (recta, circunferencia y clotoide), y no los bordes de los ramales o de las vías de giro que, en todo caso, se deducen de aquéllas (Fig. 4).

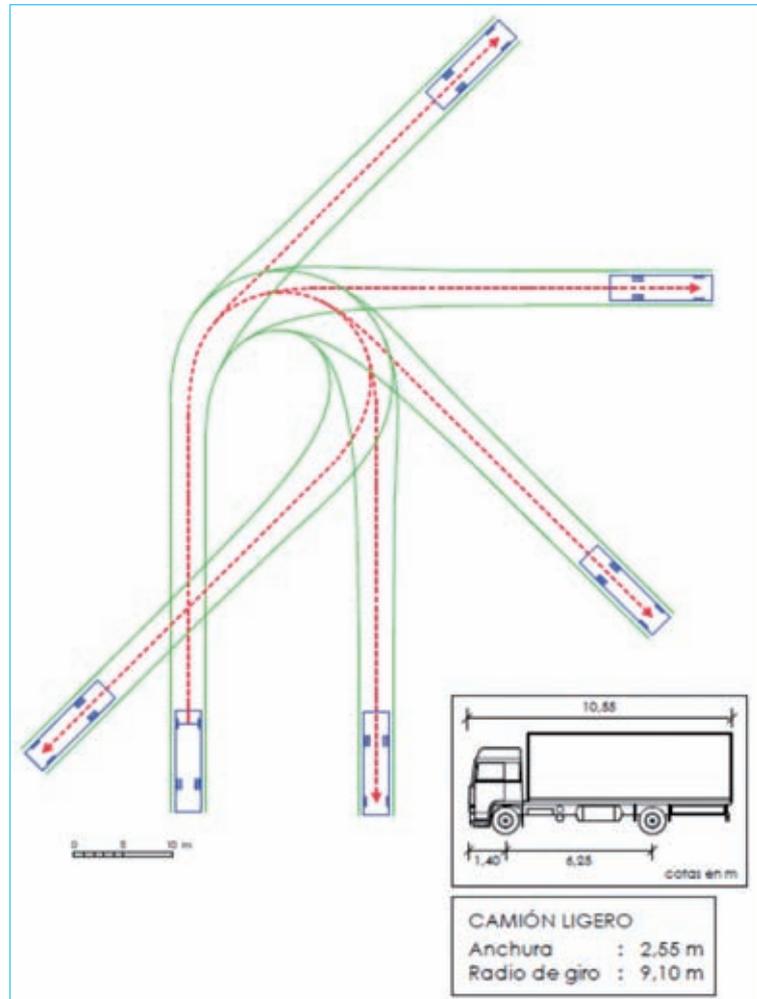


Fig. 3 Plantillas para camión ligero.

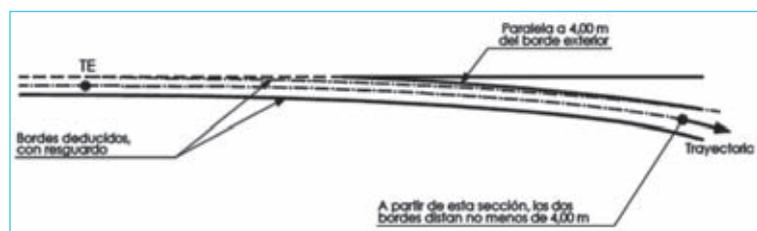


Fig. 4 Trayectoria y bordes para una salida en 4 m de anchura mínima.

- La secuencia de las alineaciones en planta. En un ramal, las irregularidades en la variación de la curvatura con el recorrido, muy fáciles de generar, suelen dar lugar a una siniestralidad anormalmente elevada.

- La inclinación longitudinal de los ramales. En ellos se puede y debe emplear unos límites superiores mayores que en el caso de los tramos que se conectan en el nudo, debido a la mucha menor longitud de aquéllos.

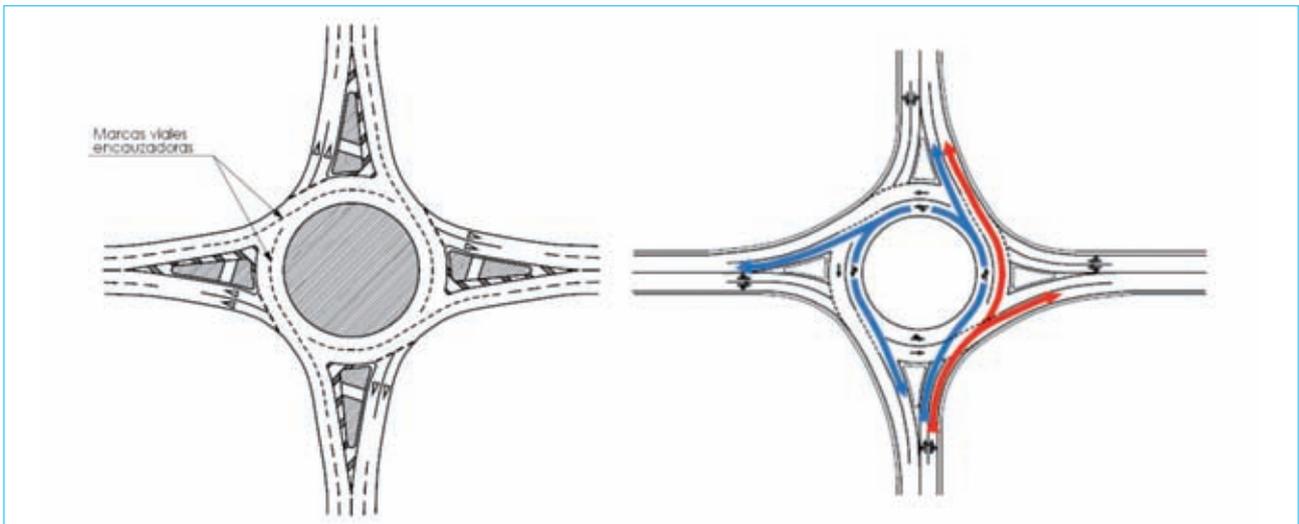


Fig. 5 Marcas viales encauzadoras en una glorieta de dos carriles, y trayectorias resultantes.

- La simultaneidad del diseño y de la señalización del nudo: el cómo se va a señalar luego un nudo es un condicionante muy importante de su diseño inicial.

### OTROS CAPÍTULOS

La Guía contiene también otros capítulos que completan detalles del proyecto y explotación de los nudos viarios:

- Uno se dedica a las particularidades del acondicionamiento de los nudos existentes.
- Otro está dedicado específicamente a la seguridad de la circulación, y en él se exponen conceptos relacionados con el riesgo, se analizan rasgos del diseño favorables y desfavorables, y se exponen las pautas de accidente más características de cada morfología. También se tratan los sistemas de contención de vehículos más apropiados a los nudos viarios.
- Hay uno sobre las ayudas a la conducción: señalización vertical y horizontal (complementando la normativa vigente, actualmente en revisión), semáforos, balizamiento e iluminación (Figs. 5 y 6).
- En otro capítulo se esbozan los fundamentos de la regulación semafórica.
- Hay un último capítulo sobre aspectos relacionados con el paisajismo y la integración en el entorno.

La Guía contiene también un completo Glosario, y se han recogido en Anexos aspectos particulares cuya inclusión en el texto principal perjudicaría su comprensión.

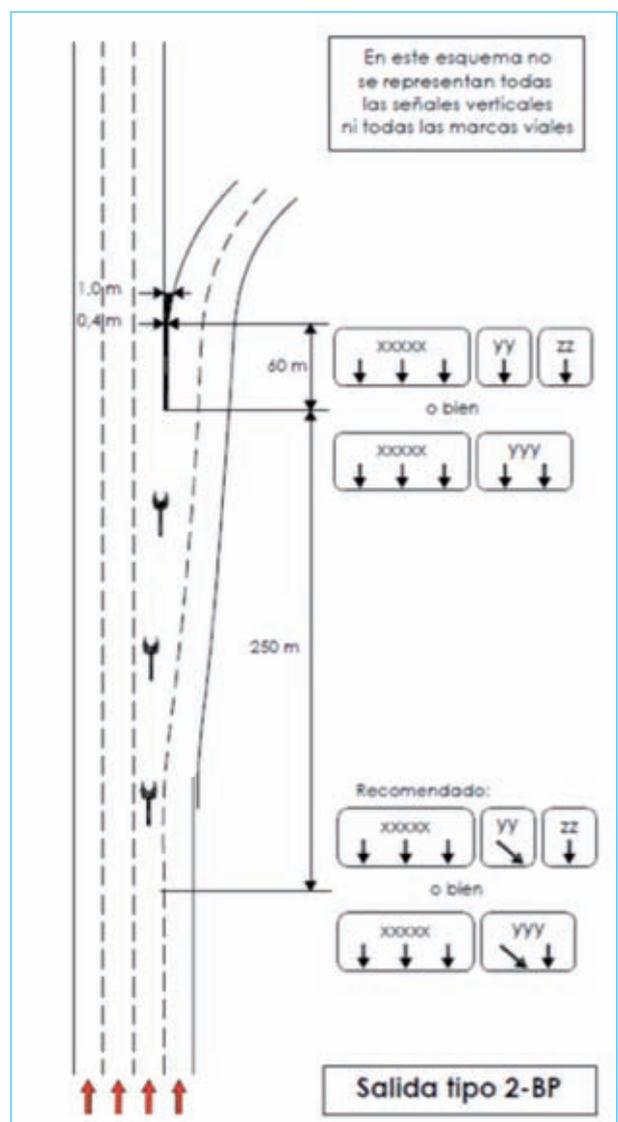


Fig. 6 Señalización de una salida del tipo 2-BP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Orden circular nº 136-62 P.T.- Normas Técnicas. Detalles del trazado de los elementos de una intersección. Ministerio de Obras Públicas. Madrid, 18 de abril de 1962.
- II. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Recomendaciones para el proyecto de intersecciones. Ministerio de Obras Públicas. Madrid, enero de 1967.
- III. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Recomendaciones para el proyecto de intersecciones (2ª edición). Ministerio de Obras Públicas. Madrid, 1975.
- IV. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Recomendaciones para el proyecto de enlaces. Ministerio de Obras Públicas. Madrid, 1968.
- V. Dirección General de Carreteras. Recomendaciones sobre glorietas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, mayo de 1989.
- VI. Norma 8.2-IC "Marcas viales" de la Instrucción de Carreteras, aprobada por Orden Ministerial de 16 de julio de 1987 (BOE del 4/8, corrección de errores 29/9).
- VII. Regulación de los accesos a las carreteras del Estado, las vías de servicio y la construcción de instalaciones de servicios, aprobada por Orden Ministerial de 16 de diciembre de 1997 (BOE del 24/1/1998, corrección de errores 20/2).
- VIII. Norma 8.1-IC "Señalización vertical" de la Instrucción de Carreteras, aprobada por Orden Ministerial de 28 de diciembre de 1999 (BOE del 29/1/2000).
- IX. Norma complementaria de la 3.1-IC "Trazado de autopistas", aprobada por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1976 (BOE del 9/4).
- X. Norma 3.1-IC "Trazado" de la Instrucción de Carreteras, aprobada por Orden Ministerial de 27 de diciembre de 1999 (BOE del 2/2/2000), modificada parcialmente por Orden Ministerial de 13 de septiembre de 2001 (BOE del 26/09).



Edición: **COMUNICACIÓN Y DISEÑO, S.L.**  
O'Donnell, 18 - 5º H • 28009 Madrid  
Telf. +34 91 432 43 18 • Fax: +34 91 432 43 19  
comdis@cydiseno.com  
www.cydiseno.com

## BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN

Deseo suscribirme por un año a la revista **CARRETERAS**.

El importe de esta suscripción (IVA incluido):

España ..... 66,00 €

Europa ..... 109,00 €

América ..... 160,00 US \$ • 124,00 €

Números sueltos ..... 24,50 € / ejemplar

lo hago efectivo mediante  Cheque  Metálico

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

**BANKINTER, S.A.**

**SWIFT: BKBKESMM IBAN: ES68 0128 0190 0201 0000 2813**

Nombre: \_\_\_\_\_

Empresa / Organismo: \_\_\_\_\_

C.I.F.: \_\_\_\_\_ Actividad: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Código postal y Ciudad: \_\_\_\_\_

Provincia y País: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_ Tel: \_\_\_\_\_



# La calidad del servicio del transporte público para promocionar una movilidad más sostenible. Caso de estudio

Juan DE OÑA LÓPEZ  
*Profesor Titular de Universidad*

Rocío DE OÑA LÓPEZ  
*Investigadora Postdoctoral*

*TRYSE Research Group*  
*Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes*  
*Departamento de Ingeniería Civil*  
*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*  
*Universidad de Granada. 18071 Granada*

## RESUMEN

*Actualmente, el vehículo propio sigue siendo el modo de transporte dominante en los viajes motorizados realizados por los ciudadanos, a pesar de ser el más ineficiente y contaminante de todos. Mediante la mejora de la calidad del servicio del transporte público se puede conseguir un cambio modal hacia modos de transporte más sostenibles. En esta investigación y a partir de datos de encuestas de satisfacción, se propone la utilización de árboles de decisión para analizar la calidad del servicio del transporte público en el área metropolitana de Granada (España) y definir así estrategias de mejora que conduzcan hacia una mayor satisfacción de los pasajeros. Este análisis no sólo se realizará para la muestra global de usuarios, sino también para grupos de usuarios con opiniones sobre el servicio más homogéneas, atendiendo a una estratificación basada en el motivo del desplazamiento, lo que permitirá formular directrices personalizadas en lugar de genéricas.*

**Palabras clave:** *Calidad del servicio, Transporte público, Encuesta de satisfacción del cliente, Percepción de los pasajeros, Árboles de decisión.*

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la congestión del tráfico, el estrés, la contaminación atmosférica, el ruido, las limitaciones a la hora de aparcar, etc. son algunos de los principales problemas que se generan por el uso masivo de vehículos particulares en las ciudades. Existen altos niveles

de insatisfacción entre los ciudadanos que se unen a los problemas medioambientales y de consumo de energía generados por esta situación.

En términos prácticos, todos los Entes de Transporte Público reconocen esta situación e intentan promover modos de transporte más sostenibles como alternati-

va al uso de vehículos particulares. Una de las principales medidas encaminadas a alcanzar un transporte sostenible en las ciudades consiste en atraer un mayor número de ciudadanos hacia el uso del transporte público mediante una oferta de servicio de alta calidad. La calidad del servicio, relacionada con una serie de variables o atributos que describen este servicio, condicionará uno u otro tipo de elección en cuanto a lo que a la modalidad de transporte se refiere. Si es posible identificar las variables que están más estrechamente relacionadas con la calidad del servicio, esto ayudará a la Administración a decidir dónde tienen que invertir sus recursos para mejorar los niveles de calidad.

Durante mucho tiempo, la evaluación de la calidad del servicio en el transporte público se ha llevado cabo desde la perspectiva del gestor (operadores de transporte y gobierno) en función de la eficiencia y la efectividad del servicio y los costes operativos<sup>(I, II, III, IV, V)</sup>. Sin embargo, en años recientes los investigadores y gestores de transporte han comenzado a comprender que el punto de vista de los pasajeros representa la perspectiva más relevante a la hora de evaluar el servicio<sup>(VI, VII, VIII, IX)</sup>.

La Norma UNE-EN 13186<sup>(X)</sup> define la calidad del servicio en el transporte público de pasajeros teniendo en cuenta diferentes puntos de vista: por un lado, el punto de vista de la Administración y de los operadores y, por otro, el punto de vista de los pasajeros (actuales y potenciales). Al analizar ambas perspectivas conjuntamente, podemos obtener información muy detallada sobre el funcionamiento del servicio. No obstante, el aspecto que resulta de mayor relevancia para los entes de transporte es saber lo que piensan los pasajeros sobre el servicio que se les está ofreciendo. Así, la calidad percibida se convierte en una potente herramienta que ayuda a los gestores del transporte público a supervisar, evaluar e implementar mejoras en el servicio y, en este sentido, las encuestas de satisfacción del cliente actualmente constituyen el modo principal de recabar las opiniones de los pasajeros sobre el mismo.

Existen diferentes técnicas que se pueden utilizar para determinar aquellas variables del servicio que tienen una mayor influencia sobre la calidad del servicio global. El método más utilizado por las empresas operadoras es el de solicitar a los clientes que puntúen cada atributo en una escala de importancia. Por el contrario, los métodos de importancia derivada, los cuales proporcionan la importancia del atributo determinando de forma estadística la fuerza de la relación de estos atributos individuales con la calidad global del servicio, aportan numerosos beneficios.

No obstante, la mayoría de estas técnicas tales, como los modelos de regresión<sup>(XI, XII)</sup>, los modelos de ecuaciones estructurados<sup>(XIII, XIV, XV, XVI)</sup> o los modelos de elección discreta<sup>(XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII)</sup>, que se utilizan para evaluar la importancia de los atributos sobre la calidad percibida por los pasajeros, tienen sus propias suposiciones y relaciones subyacentes predefinidas entre las variables dependientes e independientes. Si se violan estas suposiciones, el modelo podría dar lugar a estimaciones erróneas sobre la calidad del servicio.

Los árboles de decisión son una potente herramienta para los planificadores de los sistemas de transporte, no solo porque no presentan problemas relacionados con la violación de cualquier suposición (ellos no predefinen relaciones subyacentes entre la variable dependiente y las independientes), sino que sus resultados proporcionan una utilidad práctica considerable para los entes de transporte público. Los resultados de estos modelos son simples, fáciles de comprender gracias a su representación gráfica y tienen la capacidad de extraer la importancia de las variables. Además, pueden extraerse útiles reglas de decisión a partir de estos modelos. Esta técnica se ha aplicado con éxito para analizar la calidad del servicio en el transporte público por De Oña et al.<sup>(XXIII, XXIV)</sup> y De Oña y De Oña<sup>(XXV)</sup>. En el primer estudio, los autores adoptaron la metodología de árboles de decisión para identificar los factores clave que afectan al nivel de calidad de un servicio de autobús en Granada, mientras que en el segundo estudio se analizó la calidad del servicio ferroviario en el norte de Italia.

Posteriormente, una vez identificadas las variables más influyentes sobre la calidad del servicio en su conjunto, las administraciones competentes pueden formular estrategias más eficientes y eficaces destinadas a mejorar la calidad del servicio y, en consecuencia, la satisfacción del cliente. Sin embargo, para conseguir una política de calidad exitosa, no se recomienda desarrollar acciones de carácter general para todos los pasajeros, puesto que sus opiniones son demasiado heterogéneas. Esta heterogeneidad, presente en las opiniones de los pasajeros, constituye uno de los mayores problemas a la hora de analizar la calidad del servicio y se debe a distintos factores, tales como la naturaleza cualitativa de los aspectos del servicio del TP (Transporte Público), las diferentes actitudes de los pasajeros hacia el uso de los servicios de TP, las características socioeconómicas de los usuarios y la diversidad de los gustos, donde incluso un mismo usuario puede cambiar de opinión dependiendo de si ha reflexionado o no en cuáles son las características que describen el servicio.



Con el paso del tiempo, los gestores y operadores de los servicios de transporte público han centrado sus acciones y actividades de marketing hacia la población global (marketing en masa), sin prestar atención a los grupos específicos de pasajeros. No obstante, se ha demostrado que esta manera de diseñar políticas y llevar a cabo publicidad no es del todo eficaz. Algunos autores<sup>(xxvi)</sup> han decidido estratificar la población de acuerdo a criterios de segmentación simples tales como edad, género, motivo del desplazamiento y otros. Esto constituye una solución al enfoque genérico llevado a cabo por los gestores del servicio. La estratificación de la muestra de usuarios permitirá a los planificadores de los sistemas de transporte dirigir sus estrategias e intervenciones hacia segmentos específicos de pasajeros mediante un marketing personalizado.

En este trabajo se presenta un análisis de la calidad del servicio del transporte público metropolitano de Granada en función de las percepciones de los pasajeros. El objetivo principal de este análisis es extraer estándares de funcionamiento sólidos que sean útiles para los planificadores del servicio de transporte, con el fin de promover una movilidad más sostenible en esta ciudad y su área metropolitana. Para este fin se ha utilizado la metodología de los árboles de decisión y concretamente el algoritmo CART (Classification And Regression Trees), dados sus resultados útiles e informativos (importancia de las variables, reglas de decisión, etc.). Además, con objeto de identificar estrategias de marketing personalizadas, se ha desarrollado este análisis para todo el mercado de pasajeros, pero también para tres segmentos de usuarios diferentes, estratificados según el motivo del desplazamiento.

Este trabajo se divide en cinco secciones. La Sección 2 describe la metodología aplicada en el trabajo de investigación; la Sección 3 presenta el conjunto de datos utilizado para el análisis; la Sección 4 analiza los resultados obtenidos de los distintos modelos construidos; y por último, la Sección 5 presenta las principales conclusiones del estudio.

## METODOLOGÍA

El algoritmo CART (Classification And Regression Trees) es una metodología utilizada para construir Árboles de Decisión desarrollada por Breiman et al.<sup>(xxvii)</sup>. Este algoritmo posee la capacidad de desarrollar cualquiera de los dos siguientes tipos de árboles: un árbol de Clasificación cuando la variable objetivo es categórica y un árbol de Regresión cuando la variable objetivo es continua. En este trabajo se utiliza un árbol de Clasificación, ya que la

variable objetivo es categórica (evaluación global de la calidad del servicio: Mala, Regular y Buena). Al contrario que otros algoritmos conocidos y utilizados también para construir árboles de decisión (ID3, C4.5, etc.), la metodología CART genera árboles binarios, dividiendo o desdoblando las ramas recursivamente en dos caminos.

El desarrollo del modelo CART consiste generalmente en tres pasos: el crecimiento del árbol, la poda del mismo y la selección del árbol óptimo. El primer paso es el crecimiento del árbol. El principio que subyace tras el crecimiento del árbol consiste en dividir o partir de manera recursiva la variable objetivo para maximizar la "pureza" de los nodos hijo. Por lo tanto, este proceso comienza concentrando todos los datos en el nodo raíz. Éste se divide en dos nodos hijo sobre la base de una variable independiente (divisora o *splitter*). La variable utilizada como divisora es aquella que crea la mayor homogeneidad en los dos nodos hijo. De hecho, los datos en cada nodo hijo son más homogéneos que aquellos en el nodo padre superior. El proceso de división o partición se aplica de manera recursiva para cada nodo hijo hasta que todos los datos en el nodo sean de la misma clase (el nodo es puro), su homogeneidad no pueda mejorarse o se haya satisfecho un criterio de parada. En este caso se crean los nodos terminales.

De este modo, durante el crecimiento del árbol, se crea un conjunto de reglas de división candidatas para la partición recursiva de la variable objetivo. Estos conjuntos de reglas de división candidatas se evalúan y clasifican utilizando criterios de división basados en el índice Gini. El índice Gini mide el grado de impureza de un nodo en un árbol. Esta impureza puede definirse como sigue<sup>(xxviii)</sup>:

$$\text{Gini}(m) = 1 - \sum_{j=1}^J p^2(j|m) \quad (1)$$

Donde Gini(m) es la medida de impureza de un nodo m, J es el número de clases de la variable objetivo y  $p(j|m)$  representa la probabilidad condicional de que un caso particular pertenezca a la clase j cuando se encuentre en el nodo m. Esta probabilidad se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} p(j|m) &= \frac{p(j,m)}{p(m)} \\ p(j,m) &= \frac{\pi(j)N_j(m)}{N_j} \\ p(m) &= \sum_{j=1}^J p(j,m) \quad (2) \end{aligned}$$

donde  $\pi(j)$  es la probabilidad anterior de la clase j,  $N_j(m)$  representa el número de casos de la clase j en el nodo m y  $N_j$  es el número de caso de la clase j en el nodo raíz. Cuando un nodo es "puro" (todos los casos son de la

misma clase), esta medida (Eq. 1) alcanzará el valor mínimo igual a cero. Por el contrario, cuanto menos homogéneo sean los nodos, mayor será el valor del índice Gini.

Así, el criterio de partición, denominado como el criterio de Reducción de Gini, mide el “valor” de cada división en términos de su contribución a la maximización de la homogeneidad de los nodos hijo a través de la división o partición resultante. Si una partición resulta en dividir un nodo padre en B ramas, el “valor” de tal división se medirá como sigue:

$$\Delta\text{Gini}(x_j, T) = \text{Gini}(T) - \sum_{b=1}^B P(b) \text{Gini}(b) \quad (3)$$

Donde  $\Delta\text{Gini}(x_j, T)$  representa la medida de Reducción del índice Gini en un nodo padre T que es dividido por una variable  $x_j$ .  $\text{Gini}(T)$  indica el índice Gini (impureza) del nodo padre T,  $P(b)$  representa la proporción de los casos del nodo padre asignado al nodo hijo creado con la rama b, y  $\text{Gini}(b)$  es el índice Gini del nodo hijo creado con la rama b. Así, considerando la definición del criterio de Reducción del índice Gini, una partición que dé como resultado ramas más homogéneas tendrá un mayor valor de la Reducción de Gini.

De este modo, los nodos terminales son creados siguiendo el proceso de división hasta el punto donde no se puedan crear más particiones, dando como resultado un árbol saturado. Este árbol proporciona el mejor ajuste para el conjunto de datos a partir del cual se construye, aunque sobreajusta esta información. El sobreajuste obtenido no ayuda a clasificar de manera precisa otro conjunto de datos. Ahora bien, a fin de reducir la complejidad del árbol saturado que sobreajusta los datos de aprendizaje y crear así árboles más simples, el árbol se “poda” en el segundo paso. Esta poda se realiza de acuerdo al algoritmo Coste-Complejidad, que se basa en eliminar aquellas ramas que aportan poco al valor predictivo del árbol. Una vez podada una rama, si el aumento en el coste de la clasificación errónea es lo suficientemente menor que el descenso en los costes de complejidad, tal rama se podará, creando así un nuevo árbol. A medida que se podan más nodos se crearán árboles cada vez más simples.

El último paso implica seleccionar un árbol óptimo a partir de los árboles podados. El principio que rige la selección del árbol óptimo consiste en identificar un árbol con respecto a una medida del coste de clasificación errónea sobre el conjunto de datos de prueba (o un conjunto de datos independiente), de manera que la información en el conjunto de datos de aprendizaje no se sobreajuste. A medida que el árbol crece progresivamente, el coste de la clasificación errónea para los datos de aprendizaje

desciende monótonicamente, lo que indica que el árbol saturado proporciona siempre el mejor ajuste a los datos de aprendizaje. Por otro lado, para los datos de prueba, se observa primero un descenso inicial seguido de un aumento en el coste de la clasificación errónea una vez alcanzado el mínimo. Así, el árbol óptimo es aquel que tiene el menor coste de clasificación errónea para los datos de prueba. En Breiman et al.<sup>(xxvii)</sup> puede encontrarse una descripción más detallada del análisis CART y sus aplicaciones.

Uno de los resultados más valiosos proporcionados por el análisis CART es el valor de la importancia estandarizada de las variables independientes, que refleja el impacto de tales variables predictivas sobre el modelo. La información se obtiene para todas las variables independientes, lo que facilita la identificación de aquellas de mayor importancia.

## DATOS

Granada es una ciudad de tamaño medio en el sur de España con una población de alrededor de 500,000 habitantes en el área metropolitana. En 2003 se creó el Consorcio de Transporte de Granada para coordinar la gestión del servicio de autobús en el Área Metropolitana. El servicio de TP en el área metropolitana mueve más de 10 millones de pasajeros cada año y se articula mediante un sistema de autobuses en el que operan 15 compañías en 18 corredores de transporte independientes que unen las municipalidades metropolitanas con el centro de la ciudad de Granada.

Las líneas de la red de autobuses se conforman siguiendo una estructura radial focalizada en dos áreas centrales de la ciudad de Granada, una en el norte y la otra al sur de la ciudad, extendiéndose en todas direcciones (corredores) al resto de la aglomeración urbana. Debido a que la población de la municipalidad de Granada representa casi la mitad de la población total del área metropolitana, y a que los centros principales que generan los viajes están ubicados en estas zonas (p.ej. centros administrativos, centros de salud, centros educativos y comerciales), la estructura del sistema de transporte se ha creado con la geometría anteriormente descrita.

Desde 2003, el Consorcio de Transporte ha implementado varias mejoras en el sistema de transporte metropolitano. Estas mejoras incluyen el establecimiento de un Sistema de Tarifas Integrado, el aumento en el número de servicios al día y la creación de nuevos servicios en áreas de crecimiento urbano, entre otros. Además, en 2006 el Consorcio de Transporte llevó a cabo la pri-



mera ESC (Encuesta de Satisfacción del Cliente) para evaluar la Calidad del Servicio en el sistema de Transporte Público Metropolitano de Granada. Desde este año, ha venido realizando una ESC anualmente con el objetivo de analizar los cambios en la Calidad de Servicio percibida por los pasajeros. Cada año, se entrevista a más de mil usuarios entre los meses de marzo y abril. Las entrevistas se llevan a cabo mediante cuestionarios cara a cara que se hacen a los usuarios en las principales paradas de autobús de las líneas.

	TIPO	VARIABLE
SECCIÓN 1	INFORMACIÓN GENERAL	1.Operador, 2.Línea, 3.Hora de la entrevista, 4.Origen, 5.Destino
	DEMOGRAFÍA	1.Género, 2.Edad
	COMPORTAMIENTO DE VIAJE	1. Frecuencia de uso, 2. Motivo del viaje, 3.Disponibilidad de vehículo propio 4. Modos de transporte complementarios desde el origen a la parada del autobús, 5. Modos de transporte complementarios desde la parada del autobús hasta el destino, 6.Tipo de billete.
SECCIÓN 2	PARTE A. PERCEPCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DE LA CALIDAD DEL SERVICIO	1. Información disponible (INFORMACIÓN)
		2.Puntualidad de los servicios (PUNTUALIDAD)
		3.Seguridad a bordo (SEGURIDAD)
		4. Cortesía o amabilidad del personal (CORTESÍA)
		5. Limpieza del vehículo (LIMPIEZA)
		6. Espacio en el vehículo (ESPACIO)
		7. Temperatura en el vehículo (TEMPERATURA)
		8. Facilidad de subir/bajar al/del bus (ACCESIBILIDAD)
		9. Precio del billete (TARIFAS)
		10.Velocidad del servicio (VELOCIDAD)
		11.Frecuencia del servicio (FRECUENCIA)
		12. Proximidad a/desde el origen/destino (PROXIMIDAD)
	PARTE B. IMPORTANCIA DE LOS ATRIBUTOS DE LA CALIDAD DEL SERVICIO.	Puntúe los tres atributos más importantes entre los anteriores 12 ítems
	PARTE C. EVALUACIÓN	Evaluación Global de la calidad del servicio (EVALUACIÓN)

Tabla 1. Estructura del cuestionario y variables.

Los datos utilizados en este estudio son los recogidos en el ESC realizado entre 2008 y 2011. Los datos de estas cuatro encuestas se analizan conjuntamente a fin de estratificar la muestra de usuarios en segmentos de pasajeros que tengan una alta representación.

Los cuestionarios se han estructurado en dos secciones principales (ver Tabla 1). La primera sección recoge información general sobre el servicio (p.ej. operador, línea, hora de la entrevista, origen, destino), características demográficas de los usuarios (p.ej. sexo, edad) y sus hábitos de viaje (p.ej. motivo del desplazamiento, frecuencia de uso, tipo de billete, disponibilidad de vehículo propio, modos de transporte complementarios utilizados para acceder a/moverse desde la parada de autobús).

La caracterización de la muestra durante los años estudiados se representa en la Tabla 2. En términos generales, las muestras se caracterizan por un mayor número de mujeres que hombres. Los usuarios con edades comprendidas entre 18 y 30 años y entre 31 y 60 componen alrededor del 90% de la muestra y únicamente el 10% restante es mayor de 60 años. Más de la mitad utiliza el servicio casi a diario (4 o más veces a la semana)

y alrededor de una quinta parte de la muestra utiliza el autobús de manera frecuente (de 1 a 3 veces por semana). El resto de los encuestados utiliza el autobús con una frecuencia ocasional o esporádica (más o menos una vez al mes). En relación con el motivo del desplazamiento, existen distintos motivos entre los viajeros. Para aproximadamente la mitad de los encuestados, el motivo principal es llegar al lugar de trabajo o estudio. La otra mitad indicó que se desplazaban por otros motivos tales como ir al médico, de compras, vacaciones y otras actividades personales. El número de usuarios que dispone de vehículo propio para realizar el trayecto está casi igualmente repartido con aquellos que no disponen de éste, siendo este último grupo ligeramente mayor. La mayoría de los integrantes de la muestra accede a la parada del autobús y parte de ésta a su destino a pie, utilizando el resto otras modalidades (p.ej., coche, bus, motocicleta, bicicleta, etc.). También se recopiló información sobre el tipo de billete utilizado por los pasajeros. La mayor parte de ellos utiliza la tarjeta del Consorcio, mientras que otro grupo de considerable tamaño viaja con un billete estándar. Por último, solo una pequeña parte de la muestra utiliza el pase de Tercera Edad u otro tipo de billete.

CARACTERÍSTICA		2008	2009	2010	2011
Género	Hombre	28.19%	30.18%	28.93%	37.39%
	Mujer	71.81%	69.82%	71.07%	62.61%
Edad	{ 18-30 años }	51.21%	38.90%	56.09%	41.37%
	{ 31-60 años }	38.95%	50.68%	33.91%	45.61%
	{ > 60 años }	9.84%	10.41%	10.00%	13.02%
Frecuencia de uso	Casi a diario	53.38%	48.11%	51.27%	58.38%
	Frecuentemente	21.80%	20.44%	21.62%	22.34%
	Ocasionalmente	14.13%	19.50%	15.43%	13.10%
	Esporádico	10.70%	11.95%	11.68%	6.19%
Motivo del desplazamiento	Trabajo	29.68%	24.08%	27.80%	28.48%
	Estudios	22.03%	22.07%	23.55%	22.89%
	Otros	48.29%	53.85%	48.65%	48.63%
Disponibilidad de vehículo propio	No	56.44%	54.96%	57.71%	51.10%
	Sí	43.56%	45.04%	42.29%	48.90%
Modo transporte origen/parada	Andando	67.61%	85.43%	70.61%	79.17%
	Vehículo	32.39%	14.57%	29.39%	20.83%
Modo transporte parada/destino	Andando	89.60%	96.06%	90.71%	95.14%
	Vehículo	10.40%	3.94%	9.29%	4.86%
Tipo de billete	Billete estándar	40.22%	27.42%	22.83%	14.93%
	Tarjeta Consorcio	52.68%	64.35%	64.63%	73.06%
	Pase 3ª edad	6.59%	4.03%	6.63%	9.69%
	Otros	0.51%	4.19%	5.91%	2.32%

Tabla 2. Características de las muestras (ESC para el período entre 2008 y 2011).

El principal cambio observado en la caracterización de la muestra durante los años tiene que ver con el uso decreciente del billete estándar a favor de la tarjeta del Consorcio.

La segunda sección del cuestionario se enfoca en las opiniones de los usuarios sobre el servicio. Esta parte también se divide en 3 subpartes: Parte A, que hace referencia a la percepción de los pasajeros sobre la calidad de los doce atributos que describen el servicio (véase la Tabla 1), Parte B, sobre el rango de importancia de estos atributos (únicamente los tres atributos más importantes) y Parte C, que recoge una evaluación global sobre la calidad del servicio.

Se ha utilizado una escala Likert de 11 puntos de 0 a 10 para medir la percepción de los doce atributos que describen el servicio, además de una escala semántica de 5 puntos (Muy malo, Malo, Regular, Bueno y Muy Bueno) para medir la evaluación global de la calidad del servicio.

Se han construido cuatro modelos diferentes utilizando el algoritmo CART: un árbol de decisión para el total de la muestra y tres árboles de decisión adicionales para los segmentos de usuarios creados bajo el criterio Motivo del Desplazamiento (Trabajo, Estudios y Otros Motivos). Todos estos cuatro modelos se han generado utilizan-

do como variable objetivo la evaluación global del servicio (EVALUACIÓN) y varias de las variables recogidas en las encuestas como variables independientes: variables demográficas (2), comportamiento de viaje (8) y las percepciones sobre los doce atributos que describen el servicio (12). En el modelo se introdujo un total de 20 variables para clasificar la variable objetivo. Además, la escala de la variable objetivo se volvió a codificar en una escala semántica de 3 puntos con el fin de identificar reglas de decisión más aplicables. La escala semántica incluía las valoraciones Muy Malo y Malo como MALO, Regular como REGULAR y BUENO y MUY BUENO como BUENO.

## RESULTADOS

La Figura 1 muestra el árbol generado para el total de la muestra. El nodo raíz (Nodo 0) está dividido en dos nodos hijo (Nodo 1 y Nodo 2), utilizando la variable que maximiza la "pureza" en los dos nodos hijo. En este caso, el divisor fue la Información. Cuando la Información se califica con una puntuación mayor que 6 (Nodo 2), es probable que la CS (Calidad del Servicio) global se perciba como BUENA (75,7%). El 72,1% de la muestra se concentra en este nodo hijo (Nodo 2), lo que demuestra que este factor es un fuerte discriminador en el modelo. El siguiente mejor criterio divisor para aquellos que puntuaron la Información con un valor igual o menor que 6 es la Frecuencia. Esta es una variable clave a la hora de discriminar la percepción del usuario sobre la calidad global del servicio (CS). Agrupa a aquellos que dan una valoración global del servicio MALA o REGULAR en el lado izquierdo (Nodos 5 y 6) frente a aquellos que la puntúan como BUENA o REGULAR en el lado derecho (Nodos 8, 9 y 10). El punto de corte para la Frecuencia corresponde a un valor igual a 2. Cuando la Frecuencia percibida es muy mala (<2) y la Proximidad se considera insuficiente (<4), existe una alta probabilidad (69,7%) de que el pasajero califique la CS como MALA. Por el contrario, si las puntuaciones para Frecuencia son mayores que 2 y las de Temperatura son adecuadas (>6), la calidad CS



será BUENA. Cuando la Frecuencia obtiene una puntuación lo suficientemente alta (>6), la calificación resultante es BUENA aún cuando la puntuación para la Temperatura sea 6 o menor. Este árbol tiene una precisión del 68,56%.

Los árboles generados para los tres segmentos de usuarios estratificados por el criterio de motivo de viaje (Trabajo, Estudios y Otros Motivos) son muy diferentes del árbol generado para el total de la muestra. En lo que sigue, estos árboles de decisión se muestran en forma de reglas de decisión y no como esquemas de árboles. Las reglas de decisión son uno de los más potentes resultados que se extraen de los árboles de decisión. Proporcionan información muy valiosa para los planificadores y gestores del transporte, quienes, en función de estas reglas, pueden formular estrategias más adecuadas. De cada nodo del árbol se extrae una regla de decisión. Las reglas de decisión desarrolladas para cada segmento de pasajeros se muestran en la Tabla 3 (motivo=trabajo), 4 (motivo=estudios) y 5 (motivo=otros motivos).

Cuando el motivo del desplazamiento es el Trabajo (véase la Tabla 3), la Frecuencia se convierte en la variable más discriminadora y aquella que divide el nodo raíz. El árbol construido produce 5 nodos terminales y consecuentemente 5 reglas de decisión. Tres de ellas predicen una evaluación global igual a BUENA, una REGULAR y solo un nodo para una evaluación MALA en cuanto al servicio. Por ejemplo, la regla generada en el nodo terminal 4 indica que Si la Frecuencia es menor o igual a 6 y la Información se evalúa por encima de 6, ENTONCES la evaluación global del servicio será BUENA, con una probabilidad del 59,1%. Esta manera de presentar los resultados de los árboles de decisión aporta una información muy útil para los gestores del transporte quienes, enfocándose en estas reglas de decisión, podrán tomar decisiones sobre dónde utilizar los recur-

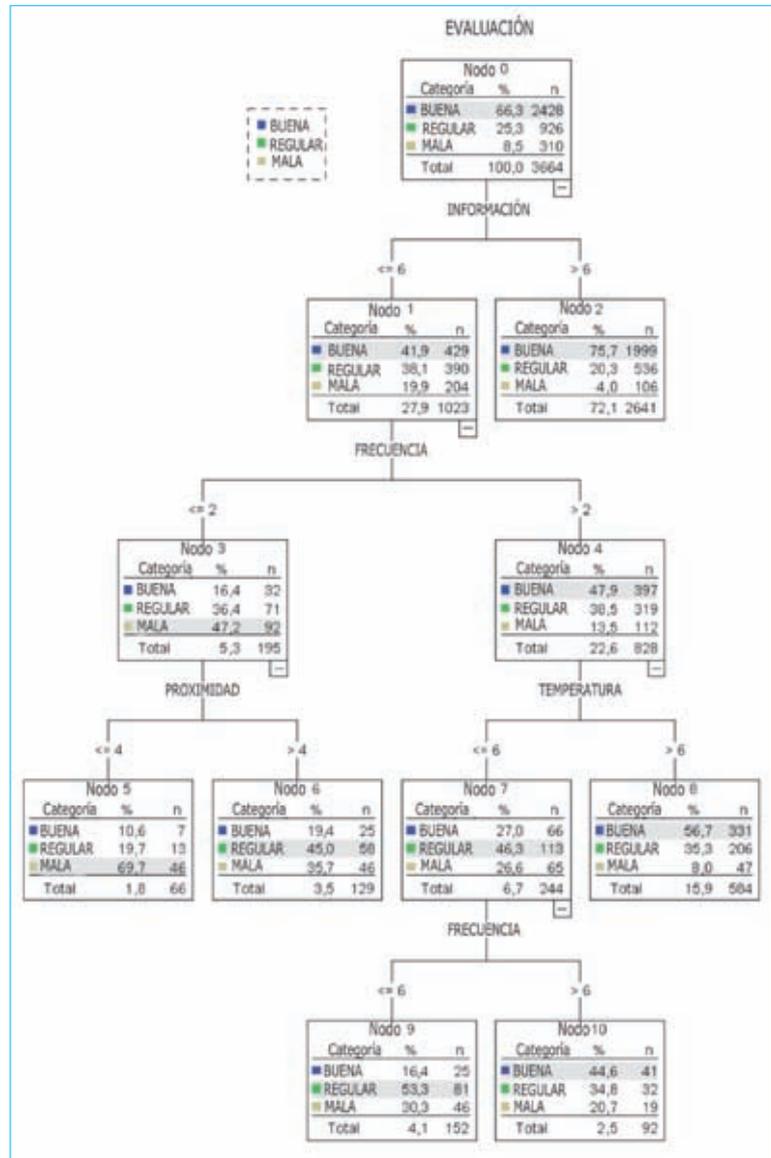


Figura 1. Árbol de Decisión para el Total de la muestra.

NODO	REGLA		NIVEL DE PRECISIÓN (%)
	SI	ENTONCES	
2	"Frecuencia" > 6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	79.0
4	" Frecuencia " <=6 e "Información" > 6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	59.1
5	" Frecuencia " <=6 e "Información" <=6 y "Frecuencia" <=2	El Servicio se puntúa como "Malo"	63.6
6	" Frecuencia " <=6 e "Información" <=6 y "Frecuencia" >2 y "Limpieza" <=6	El Servicio se puntúa como "Regular"	63.2
7	" Frecuencia " <=6 e "Información" <=6 y "Frecuencia" >2 y "Limpieza" >6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	46.2

Tabla 3. Reglas de decisión extraídas del Árbol de Decisión construido para el escenario Trabajo.

NODO	REGLA		NIVEL DE PRECISIÓN (%)
	SI	ENTONCES	
3	"Puntualidad" <=6 y "Seguridad" <=4	El Servicio se puntúa como "Malo"	64.3
4	"Puntualidad" <=6 y "Seguridad" >4	El Servicio se puntúa como "Regular"	54.1
6	"Puntualidad" >6 y "Temperatura" >6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	74.9
7	"Puntualidad" >6 y "Temperatura" <=6 y "Frecuencia" <=6	El Servicio se puntúa como "Regular"	58.8
8	"Puntualidad" >6 y "Temperatura" <=6 y "Frecuencia" > 6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	62.1

Tabla 4. Reglas de decisión extraídas del Árbol de Decisión construido para el escenario Estudios.

Por ejemplo, en la regla de decisión para el nodo 4, podrían decidir si mejorar la información en caso de que resultase demasiado costoso alcanzar niveles de calidad más altos en la frecuencia del servicio.

Observando los resultados de los otros dos segmentos de pasajeros, cuando el motivo del desplazamiento son los Estudios (véase la Tabla 4), la variable más importante es la Puntualidad. Esto tiene sentido puesto que los estudiantes necesitan llegar puntualmente a las clases y exámenes. En este caso, se generaron además cinco nodos terminales que involucraban diferentes variables del árbol generado para el escenario Motivos de Trabajo. Las variables utilizadas para estas reglas de decisión fueron Puntualidad, Seguridad, Temperatura y Frecuencia.

Respecto de los Otros motivos del desplazamiento (véase la Tabla 5), se han utilizado también otras variables para generar el árbol, como por ejemplo las Tarifas, que no se consideraron anteriormente ni para la muestra total de usuarios ni para los pasajeros que se desplazan por motivos de trabajo o estudios. En este caso, la Información se convierte en la variable más discriminante en el nodo raíz, como sucede con el árbol que resulta de la muestra total.

Estos tres modelos tienen una precisión del 65,86%, 67,67% y 69,58% respectivamente y la precisión de las reglas de decisión es alta en todos ellos, con valores superiores al 55% en la mayoría

de los mismos, correspondiendo los valores por debajo de esta tasa mayoritariamente al árbol de decisión creado para el escenario Otros Motivos. En este último, se observa aún una alta heterogeneidad entre las opiniones de los usuarios. Otro resultado crucial proporcionado por el modelo CART es la importancia de las variables, las cuales se obtienen mediante el índice de importancia<sup>(xxviii)</sup>. La Tabla 6 muestra la importancia normalizada de las variables deducidas de cada uno de los modelos desarrollados.

La Puntualidad, la Temperatura, la Información y la Frecuencia son los atributos más importantes en la CS en el transporte de autobús metropolitano para el total del mercado (Tabla 6). Varios autores que han analizado la CS para el transporte en autobús también han identificado la Puntualidad como uno de los atributos que poseen mayor impacto sobre la CS total<sup>(xxvi, xxviii)</sup>, además de la Temperatura y la Frecuencia, que también fueron identificadas por tener un peso considerable sobre la CS según Dell'Olio et al.<sup>(xxvi)</sup>.

Cuando se determinan las variables más importantes en cada segmento de la muestra se observan diferencias significativas. Por ejemplo, en el caso de las personas que se desplazan al trabajo, la variable más importante fue la Frecuencia, seguida de Información, Puntualidad

NODO	REGLA		NIVEL DE PRECISIÓN (%)
	SI	ENTONCES	
2	"Información" > 6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	78.1
5	"Información" <=6 y "Temperatura" <=6 e "Información" <=2	El Servicio se puntúa como "Malo"	70.4
6	"Información" <=6 y "Temperatura" <=6 e "Información" > 2	El Servicio se puntúa como "Regular"	43.2
7	"Información" <=6 y "Temperatura" >6 y "Frecuencia" <=2	El Servicio se puntúa como "Malo"	42.9
10	"Información" <=6 y "Temperatura" >6 y "Frecuencia" >2 y "Tarifas" >6	El Servicio se puntúa como "Bueno"	66.7
11	"Información" <=6 y "Temperatura" >6 y "Frecuencia" >2 y "Tarifas" <=6 e "Información" <=4	El Servicio se puntúa como "Regular"	45.1
12	"Información" <=6 y "Temperatura" >6 y "Frecuencia" >2 y "Tarifas" <=6 e "Información" >4	El Servicio se puntúa como "Bueno"	56.6

Tabla 5. Reglas de decisión extraídas del Árbol de Decisión construido para el escenario Otros Motivos.



y Espacio. En el caso de personas que se desplazan por estudios, la variable de mayor importancia fue la Puntualidad y no la Frecuencia, como ocurrió con el anterior grupo de usuarios. En el caso de los estudiantes, la Temperatura, el Espacio y la Seguridad son asimismo algunas de las variables más importantes. Por último, en el caso de personas que se desplazan por otros motivos como, por ejemplo, para ir al médico, de compras, vacaciones, etc., la variable Información mantiene el primer lugar en el ranking de importancia. Estas diferencias entre los segmentos de la muestra demuestran que es muy importante analizar estos grupos de pasajeros por separado, a fin de descubrir sus necesidades y preferencias en relación con el servicio y para conseguir un marketing mejor y más apropiado para cada uno de ellos.

**CONCLUSIONES**

El uso masivo de vehículos propios en las ciudades y la necesidad de impulsar una movilidad más sostenible en ellas y en sus áreas metropolitanas han forzado a los entes responsables del transporte público a buscar diferentes soluciones para contrarrestar esta situación. Una de estas soluciones es promover el uso de modos de transporte público mejorando sus niveles de calidad.

Para alcanzar este objetivo se ha propuesto la metodología de árboles de decisión como un enfoque interesante para los planificadores del sistema de transporte, a fin de que puedan evaluar la calidad del servicio y extraer información útil y potente a partir de sus resultados, ayudándoles a formular estrategias más exitosas.

Con esta metodología se analizó la calidad del transporte por autobús público metropolitano en la ciudad de Granada (España) y se identificaron las variables que han tenido un impacto notable en la calidad del servicio. Además, a fin de disminuir la heterogeneidad existente entre las opiniones de los pasajeros, se han estudiado tres segmentos diferentes de los mismos en función del motivo de sus desplazamientos: Trabajo, Estudios y Otros.

Los modelos CART han proporcionado buenas predicciones en los cuatro árboles de decisión que se han construido, con valores de precisión por encima del 65,86%. Asimismo, las tasas de precisión de las reglas de decisión extraídas de los árboles han sido altas, siendo mayores del 55% en casi todas ellas.

Se han identificado algunas diferencias entre las variables más importantes del total del mercado y los segmentos del mismo. Mientras que para el mercado total y los

MUESTRA TOTAL		SEGMENTOS DE USUARIOS EN FUNCIÓN DEL MOTIVO DEL DESPLAZAMIENTO					
		TRABAJO		ESTUDIOS		OTROS MOTIVOS	
PUNTUALIDAD	100.0%	FRECUENCIA	100.0%	PUNTUALIDAD	100.0%	INFORMACIÓN	100.0%
TEMPERATURA	92.3%	INFORMACIÓN	93.4%	TEMPERATURA	90.1%	PUNTUALIDAD	71.3%
INFORMACIÓN	91.3%	PUNTUALIDAD	89.9%	ESPACIO	89.7%	LIMPIEZA	65.2%
FRECUENCIA	86.0%	ESPACIO	80.8%	SEGURIDAD	71.1%	SEGURIDAD	61.2%
SEGURIDAD	70.3%	LIMPIEZA	80.7%	INFORMACIÓN	51.3%	CORTESÍA	51.6%
LIMPIEZA	63.4%	TEMPERATURA	74.8%	VELOCIDAD	47.8%	FRECUENCIA	47.7%
VELOCIDAD	63.2%	VELOCIDAD	73.5%	CORTESÍA	40.4%	TARIFAS	46.3%
ESPACIO	60.8%	ACCESIBILIDAD	59.2%	PROXIMIDAD	38.5%	TEMPERATURA	45.1%
CORTESÍA	57.0%	SEGURIDAD	58.1%	TARIFAS	32.1%	PROXIMIDAD	38.3%
PROXIMIDAD	50.0%	CORTESÍA	56.1%	ACCESIBILIDAD	28.1%	ACCESIBILIDAD	35.3%
TARIFAS	47.7%	PROXIMIDAD	37.9%	LIMPIEZA	27.2%	ESPACIO	30.9%
ACCESIBILIDAD	43.0%	TARIFAS	37.3%	FRECUENCIA	14.1%	VELOCIDAD	20.7%
BILLETE	0.9%	VEHÍCULO PRIVADO	4.7%	EDAD	3.3%	BILLETE	2.6%
		SEXO	4.1%			EDAD	.6%
		EDAD	3.2%			FRECUENCIA DE USO	.4%
		BILLETE	1.0%			MODO DESDE	.3%
		MODO A	1.0%			VEHÍCULO PRIVADO	.2%
		MODO DESDE	0.7%				

Tabla 6. Valores de importancia derivadas y normalizadas.



pasajeros que toman el autobús por motivos de estudios la característica más importante del servicio es la Puntualidad, para las personas que se desplazan para ir al trabajo la variable más influyente es la Frecuencia. Si los pasajeros viajan por otros motivos, estos están más relacionados con la Información. Ello demuestra que tales segmentaciones pueden llevar a una homogeneidad en las opiniones de los usuarios.

Así, las políticas que aumentan la calidad del servicio en el transporte público únicamente pueden tener éxito si se desarrollan medidas específicas dirigidas hacia grupos específicos de pasajeros, considerando por tanto los marcos de actuación genéricos como poco recomendables.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio está patrocinado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Economía de la Junta de Andalucía, a través del Proyecto de Investigación de Excelencia número P08-TEP-03819. Los autores también desean agradecer al Consorcio de Transportes de Granada por proporcionar el conjunto de datos para este estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Carter DN, Lomax TJ. (1992). Development and application of performance measures for rural public transportation operators. *Transportation Research Record*, 1338, 28–36.
- II. Fielding GJ. (1992). Transit performance evaluation in the USA. *Transportation Research*, 26A(6), 483–491.
- III. Fielding GJ, Babitsky TJ, Brenner ME. (1985). Performance evaluation for bus transit. *Transportation Research*, 19A(1), 73–82.
- IV. Hensher DA, Daniels R. (1995). Productivity measurement in the urban bus sector. *Transport Policy*, 2(3), 179–194.
- V. Pullen WT. (1993). Definition and measurement of quality of service for local public transport management. *Transport Reviews*, 13(3), 247–264.
- VI. Parasuraman A, Zeithaml VA, Berry LL. (1988). SERVQUAL: a multi-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. *Journal of Retailing*, 64(2), 12–40.
- VII. Carman J. (1990). Consumer perceptions of service quality: an assessment of the SERVQUAL dimensions. *Journal of Retailing*, 66, 33–55.
- VIII. Gourdin K, Kloppenborg TJ. (1991). Identifying service gaps in commercial air travel: the first step toward quality improvement, *Transportation Journal*, 31(1), 22–30.
- IX. Transportation Research Board (2004): *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, second ed.
- X. UNE-EN13186 (2003). Transporte. Logística y servicios. Transporte público de pasajeros. Definición de la calidad del servicio, objetivos y mediciones. [AENOR](#).
- XI. Kim, Y. K, Lee, H. R. (2011). Customer satisfaction using low cost carriers. *Tourism Management*, 32(2), 235–243.
- XII. Weinstein, A. (2000). Customer satisfaction among transit riders. How customer rank the relative importance of various service attributes. *Transportation Research Record*, 1735, 123–132.
- XIII. Eboli, L., & Mazzulla, G. (2007). Service quality attributes affecting customer satisfaction for bus transit. *Journal of Public Transportation*, 10(3), 21–34.
- XIV. Eboli, L., & Mazzulla, G. (2012). Structural Equation Modelling for Analysing Passengers' Perceptions about Railway Services. *Procedia-Social and Behavioural Science*, 54, 96–106.
- XV. Irfan Syed Muhammad, Mui Hung Kee Daisy, & Shahbaz Saman (2011). Service Quality in Rail Transport of Pakistan: A Passenger Perspective. En *Anales de la tercera South Asian International Conference. Conferencia internacional de gestión, ética en los negocios y economía*. 28-29 de diciembre de 2011, Lahore, Pakistán.
- XVI. Ngatia, G. J., Okamura, T., & Nakamura, F. (2010). The Structure of Users' Satisfaction on Urban Public Transport Service in Developing Country: the Case of Nairobi. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8.
- XVII. Eboli, L., & G. Mazzulla. (2008). Willingness-to-Pay of Public Transport Users for Improvement in Service Quality. *European Transport*, 38, 107–118.
- XVIII. Eboli, L., & Mazzulla, G. (2010). How to capture the passengers' point of view on a transit service



through rating and choice options. *Transport Reviews*, 30, 435-450.

XXIX. Hensher, D. A. (2001). Service quality as a package: What does it mean to heterogeneous consumers. *Noveno Congreso Mundial sobre Investigación en el ámbito del Transporte*. Seúl, Corea, 22-27 de julio.

XX. Hensher, D.A., & Prioni, P. (2002). A service quality index for an area-wide contract performance assessment regime. *Journal of Transport Economics and Policy*, 36(1), 93-113.

XXI. Hensher, D. A., Stopper, P., & Bullock, P. (2003). Service quality-developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research Part A*, 37, 499-517.

XXII. Marcucci, E., Gatta, V. (2007). Quality and public transport service contracts. *European Transport*, 36, 92-106.

XXIII. De Oña, J., de Oña, R., Calvo, F.J. (2012a). A classification tree approach to identify key factors

of transit service quality. *Expert Systems with Applications*, 39, 11164-11171.

XXIV. De Oña R, Eboli L, Mazzulla G. (2012b). Key factors affecting rail service quality. a decision tree approach. *Società Italiana Docenti di Transporti*. Padua, 18-19 de octubre.

XXV. De Oña and de Oña (2013). Analyzing transit service quality evolution using decision trees and gender segmentation. *WIT Transactions on the Built Environment*, 130, 611-621

XXVI. Dell'Olio L, Ibeas A, Cecín, P. (2010). Modelling user perception of bus transit quality. *Transport Policy* 17(6):388-397.

XXVII. Breiman L, Friedman JH, Stone CJ, Olshen RA. (1984). *Classification and Regression Trees*. Boca Raton, Fla: Chapman & Hall/CRC.

XXVIII. Kashani, A. T., Mohaymany, A. S. (2011). Analysis of the traffic injury severity on two-lane, two-way rural roads based on classification tree models. *Safety Science*, 49, 1314-1320. 

## Solicitud de Ingreso



Asociación Española de la Carretera

Goya, 23 - 4ª dcha • 28001 MADRID  
Tel.: 91 577 99 77 - Fax: 91 576 65 22  
e-mail: aec@aecarretera.com  
www.aecarretera.com

D/D<sup>a</sup>: \_\_\_\_\_

Cargo/Profesión: \_\_\_\_\_

En nombre de la Empresa u Organismo: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_ C.P.: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_ http: \_\_\_\_\_

Datos de facturación:

Empresa/Organismo: \_\_\_\_\_ C.I.F.: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_ C.P.: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

**Solicita su admisión como miembro de la ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA con una cuota anual de \_\_\_\_\_ euros.**

\_\_\_\_\_, de \_\_\_\_\_ de 20 \_\_\_\_\_ Firma y Sello \_\_\_\_\_

---

Autorizo a que los datos facilitados sean incluidos en ficheros automatizados de la Asociación Española de la Carretera, declarada de Utilidad Pública por Orden Ministerial de 24 de febrero de 1998, para que sean utilizados por esa Asociación con el fin de remitir información acerca de sus actividades y de figurar en sus publicaciones.

En cumplimiento de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, usted podrá ejercitar los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición, dirigiéndose al titular del fichero: Asociación Española de la Carretera, Goya 23, 4ª dcha., 28001 Madrid.

Nombre: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

# RECOMENDACIONES DE REDACCIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS PARA LA REVISTA CARRETERAS

1. En la primera página aparecerá el **título** del artículo, en **español e inglés**, nombre del autor, lugar de trabajo y cargo, así como dirección postal completa y de e-mail, y teléfono de contacto. Se recomienda añadir un **título reducido** (entre 30 y 35 caracteres -letras y espacios) para su inclusión en la portada de la revista .
2. Se incluirá, al comienzo del texto, el **resumen** del artículo, con una longitud máxima de 150 palabras, en **español y en inglés**. Además del resumen, se incluirán las **palabras clave** del trabajo, con un máximo de 5 (en caso de no recibirse, *Carreteras* se reserva la posibilidad de realizar y publicar un resumen propio)<sup>(\*)</sup>.
3. Los nombres comerciales o marcas, de productos, no podrán incluirse en el título, ni los nombres de empresas en el título o en el resumen del artículo.
4. Se escribirá en DIN A4, con un interlineado de 1,5 y a doble espacio entre párrafos. La letra será Arial o Helvética, cuerpo 10. Las páginas estarán numeradas. Se respetará un margen aproximado de 2,5 cm por cada lado.
4. Es necesario incluir, al final del texto, las **referencias bibliográficas** (o, en su caso, bibliografía), que se numerarán mediante números romanos, tanto en dicha lista final, como en las referencias dentro del texto. Se recomienda también la inclusión de **conclusiones**.
5. Se recomienda, en la medida de lo posible, **la cita y referencia a otros artículos publicados en la Revista Carreteras**, con el propósito de mejorar el posicionamiento de la misma en el factor de impacto que publica el ISI Journal Citation Reports (JCR), una base de datos multidisciplinar producida por el Institute for Scientific Information (ISI) que permite determinar la importancia relativa de las revistas por área de conocimiento. Permite además conocer las revistas científicas de mayor impacto basándose en el análisis de las citas de los artículos que publican. Todos los artículos publicados en *Carreteras* desde el año 2003 están referenciados en la web de la Asociación Española de la Carretera ([www.aecarretera.com](http://www.aecarretera.com)), que cuenta con un potente buscador que facilita y agiliza la

- localización de trabajos técnicos introduciendo las palabras-clave correspondientes.
6. Es recomendable la inclusión de fotografías, tablas y figuras, con su pie explicativo correspondiente. Todo el material se reproducirá en **blanco y negro**.
  7. Las fotografías se remitirán en formato **digital**<sup>(\*\*)</sup>.
  8. El artículo, con las condiciones anteriormente expuestas, tendrá una **extensión de referencia** de 15 páginas (mínimo 12 y máximo 18), incluyendo las fotografías, tablas y figuras que apoyen gráficamente el texto, además de la lista de referencias bibliográficas. Fuera de dicho intervalo, se estudiará una solución específica, que podrá incluir su revisión o su publicación en dos partes diferenciadas.
  9. En el proceso de **selección de artículos**, tendrán preferencia aquéllos que sean **originales**, que no hayan sido publicados antes ni estén en proceso de revisión por otra publicación.

## NORMAS PARA NÚMEROS ESPECIALES O MONOTEMÁTICOS DE CARRETERAS

1. Se respetarán, siempre que sea posible, las recomendaciones individuales anteriormente expuestas.
2. El número de artículos presentado para los especiales o monotemáticos, y el número de páginas por artículo, pueden variar, siempre y cuando no superen en total 145 páginas editadas sobre la base de las anteriores normas. Se recomienda un máximo de 8-9 artículos.
3. Se incluirá una presentación del número por parte del coordinador del mismo.

### IMPORTANTE

- A. El texto del artículo o documentos a publicar se remitirá en soporte informático tipo **Word**.
- B. Las tablas y figuras se enviarán en un archivo informático independiente al del texto. Las figuras se adecuarán para su publicación en **blanco y negro**.
- C. Las **Fotografías** se remitirán en formato **digital** debiendo cumplir las siguientes condiciones:
  - Formatos .tif. o .jpg.
  - Resolución igual o mayor a 150 pixels/pulgada.
  - Tamaño nunca inferior a 10x15 cm.

(\*) La razón de incluir estos resúmenes es aumentar la referencia a los artículos publicados por *Carreteras* en las bases de datos científicas internacionales.

(\*\*) A menos que el autor exprese específicamente su desacuerdo, una vez publicadas, las fotos pasarán a engrosar el archivo fotográfico de *Carreteras*, que se reserva el derecho de su futura publicación en otros textos.

## MENCIÓN DE LA REVISTA CARRETERAS EN BASES DE DATOS CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS NACIONALES E INTERNACIONALES

La revista *Carreteras* aparece citada actualmente (tanto la propia cabecera como el resumen de los artículos técnicos que recoge) en distintas bases de datos científicas, tanto nacionales como internacionales. A saber:

### Nacionales:

- Bases de Datos del Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología (IEDCYT) –antes CINDOC- del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, [www.csic.es](http://www.csic.es)).
- Base de Datos de Ciencia y Tecnología (ICYT).
- Catálogo Colectivo de los Fondos de las Bibliotecas del CSIC (CIRBIC).
- Base de Datos del Centro de Documentación del Transporte y las Comunicaciones del Ministerio de Fomento –[www.fomento.es](http://www.fomento.es)–.
- DIALNET, Base de Datos de Publicaciones Técnicas y Científicas de la Universidad de La Rioja.

### Internacionales:

- Base de Datos DIIT (Documentación Internacional de Investigación del Transporte), gestionada dentro del Programa de Transporte de la OCDE.
- Base de Datos Ulrichs –[www.ulrichsweb.com](http://www.ulrichsweb.com)–.
- Engineering Index –[www.ei.org](http://www.ei.org)–.
- Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, Caribe, España y Portugal.
- SCOPUS -<http://info.scopus.com>

### Contacto: Marta Rodrigo

Directora Ejecutiva de la revista *Carreteras* / Asociación Española de la Carretera  
Goya 23 4º Dcha. 28001 MADRID / Tf. 34 91 577 99 72 Fax 34 91 576 65 22 / e-mail: [mrodrigo@aecarretera.com](mailto:mrodrigo@aecarretera.com)

### Contacto: Recaredo Romero

Director Técnico de la revista *Carreteras* / e-mail: [recaredo@recaredoluz.jazztel.es](mailto:recaredo@recaredoluz.jazztel.es)



# CARRETERAS

Especial: IRF Riad 2013





## COLLOSA CONSTRUCCIONES Y OBRAS LLORENTE, S.A.

Aluminio, 17  
47012 Valladolid  
Tel: 983 218 191 Fax: 983 218 192

E-mail: [construccion@collosa.es](mailto:construccion@collosa.es)

Capital Social: 2.000.000 euros

Ámbito de actuación: Internacional

Facturación: de 60 ,11 a 300,51 M euros



Web

### SUMINISTROS / SUPPLIES

#### Maquinaria y Equipos /

#### *Machines and equipment*

Vialidad invernal / *Winter maintenance*

#### Materiales / *Materials*

Mezclas asfálticas en caliente / *Hot mixed asphalt*

Mezclas asfálticas en frío / *Cold mixed asphalt*

Mezclas asfálticas con ligantes modificados  
/ *Asphalt with modified binders*

Mezclas drenantes / *Porous asphalt*

#### Materias primas y aditivos /

#### *Raw materials and additives*

Materiales granulares / *Granular materials*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS

#### *WORK TECHNIQUES*

#### Construcción y conservación /

#### *Construction and maintenance*

Conservación integral / *Maintenance by contract*

Movimiento de tierras / *Earthworks*

Pavimentación con mezclas asfálticas en caliente

/ *Paving with hot mix asphalt*

Pavimentación con mezclas asfálticas en frío

/ *Paving with cold mix asphalt*

Pavimentación con mezclas de ligantes asfálticos  
modificados /

*Paving with asphalt with modified binders*

Pavimentación con mezclas drenantes /

*Paving with porous asphalt*

Puentes / *Bridges*

Reciclado de pavimentos / *Pavement recycling*

Riegos asfálticos / *Surface coats and dressings*

Riegos con ligantes modificados / *Surface coats  
and dressings with modified binders*

#### Consultoría e Ingeniería /

#### *Consulting and engineering*

Evaluación de firmes / *Pavement evaluation*

Inventario de carreteras / *Road inventory*

Proyectos de rehabilitación /

*Rehabilitation project*

#### Control de calidad / *Quality control*

En laboratorio / *In the laboratory*

# COPISA

## GRUPO

**COPISA**  
**CONSTRUCTORA**  
**PIRENAICA S.A.**  
Plaza Europa 2-4. Torre Copisa  
08902 L'HOSPITALET  
DE LLOBREGAT (Barcelona)  
Tel: +34 93 493 01 00  
Fax: +34 93 493 01 36  
E-mail: copisa@copisa.com  
Web: www.grupocopisa.com



1/2

### SUMINISTROS / *SUPPLIES*

#### Varios / *Miscellaneous*

Aparcamientos / *Parkings*

#### Otros capítulos no incluidos aquí / *Other items not included here*

Refinerías y petroquímicas /  
*Refinery and petrochemical*

Estaciones producción energía /  
*Energy production stations*

Obras lineales / *Pipeline works*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS / *WORK TECHNIQUES*

#### Construcción y conservación / *Construction and maintenance*

Conservación integral / *Maintenance by contract*

Consolidación de terrenos / *Soil consolidation*

Drenajes / *Drainage*

Estructuras / *Structures*

Fresado de pavimentos / *Pavement milling*

Impermeabilización / *Waterproofing*

Juntas prefabricadas de puentes /  
*Precast bridge deck joints*

Limpieza / *Cleaning*

Movimiento de tierras / *Earthworks*

Pavimentación con hormigón hidráulico /  
*Paving with portland cement concret*

Pavimentación con mezclas asfálticas en caliente /  
*Paving with hot mix asphalt*

Pavimentación con mezclas asfálticas en frío / *Pa-  
ving with cold mix asphalt*

Pavimentación con mezclas de ligantes asfálticos  
modificados /

*Paving with asphalt with modified binders*

Pavimentación con mezclas drenantes /  
*Paving with porous asphalt*

Pavimentación con mezclas hidráulicas /  
*Paving with hydraulic binder treated materials*

Perforación de túneles / *Tunneling*

Protección de taludes / *Slope protection*

Puentes / *Bridges*

Reciclado de pavimentos / *Pavement recycling*

Rehabilitación de puentes / *Bridge rehabilitation*

Restitución de servicios / *Services restoring*

# COPISA

---

## G R U P O

2/2

Riegos asfálticos / *Surface coats and dressings*

Riegos con ligantes modificados /  
*Surface coats and dressings with modified binders*

Sellado / *Sealing*

Voladuras / *Blasting*

Infraestructuras / *Infrastructure projects* (Maritimas y fluviales/ *Sea and river*; Ferroviarias /

Obras hidráulicas (presas, tratamiento aguas, etc)  
*/Hydraulic works(dams, water treatment, etc*

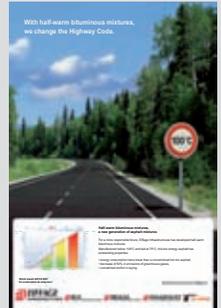
Obras edificación / *Buildings*



RUS  
TRIALSA  
PANASFALTO

## EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS S.A.

Pol. Ind. Ctra de la Isla, parcela E.L. 3  
(Ctra. el Copero - esq. calle Río Viejo)  
41703 Dos Hermanas (Sevilla)  
Tel: 954 610 400 Fax: 954 610 112  
Ámbito de actuación: Nacional



Web

### SUMINISTROS / SUPPLIES

#### **Materiales / Materials**

Mezclas asfálticas en caliente / *Hot mixed asphalt*

#### **Materias primas y aditivos / Raw materials and additives**

Emulsiones asfálticas / *Bitumen emulsions*

Materiales granulares / *Granular materials*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS / WORK TECHNIQUES

#### **Construcción y conservación / Construction and maintenance**

Construcción de Carreteras / *Road construction*

Conservación integral / *Maintenance by contract*

Fresado de pavimentos / *Pavement milling*

Pavimentación con hormigón hidráulico /  
*Paving with portland cement concret*

Pavimentación con mezclas asfálticas en caliente  
*/ Paving with hot mix asphalt*

Pavimentación con mezclas asfálticas en frío /  
*Paving with cold mix asphalt*

Reciclado de pavimentos / *Pavement recycling*

#### **Control de calidad / Quality control**

En obra / *In situ*

En laboratorio / *In the laboratory*

En planta / *In plant*

Ensayo de materiales / *Material testing*



**EMSA**  
**(Estudios Comerciales e  
Industriales de Maquinaria, S.A.)**

Crta de la Marañosa km 0,8  
28320 Pinto (Madrid)

Tel: 913 078 133 Fax:9130574 762

E-mail: [emsa@emsa-machinery.net](mailto:emsa@emsa-machinery.net)

Ámbito de actuación: Nacional



Web

## SUMINISTROS / SUPPLIES

### **Maquinaria y Equipos / *Machines and equipment***

Cisternas para riegos asfálticos / *Bitumen spray tankers*

Compactadoras / *Compactors*

Extendedoras de mezclas asfálticas / *Road pavers for asphalt*

Extendedoras de mezclas hidráulicas / *Road pavers for mixtures treated with hydraulic binders*

Fresadoras de pavimentos / *Milling machines*

Machacadoras / *Aggregate crushers*

Plantas de fabricación de mezclas asfálticas en caliente / *Hot mix asphalt plants*

Plantas de fabricación de mezclas asfálticas en frío / *Cold mix asphalt plants*



**INECO**  
Paseo de la Habana, 138  
28036 Madrid  
Tel: 914 521200

Ámbito de actuación: Internacional  
Facturación: de 60 ,11 a 300,51 M euros



[Web](#)

## *EJECUCIÓN DE TRABAJOS / WORK TECHNIQUES*

### **Consultoría e Ingeniería / Consulting and engineering**

Auscultación de firmes / *Pavement monitoring*

Proyectos de estructuras de fábrica /  
*Engineering structure project*

Proyecto de estructuras metálicas /  
*Metallic structure project*

Proyectos de rehabilitación /  
*Rehabilitation project*

Proyectos de trazados / *Geometric design*

### **Medio ambiente / Environment**

Control de vegetación / *Vegetation control*

Impacto ambiental / *Environmental impact*

Medición de índices de ruido /  
*Sound level measurement*

Paisajismo / *Landscaping*

Plantaciones vegetales / *Planting*

Protección y revegetación de taludes /  
*Slope protection and planting*

## **Seguridad Vial y Gestión de Tráfico / Road safety and traffic management**

Estadística / *Statistics*

Pavimentos especiales / *Specialised pavements*

Kao Corporation S.A.



## KAO CORPORATION S.A.

Puig dels Tudons, 10

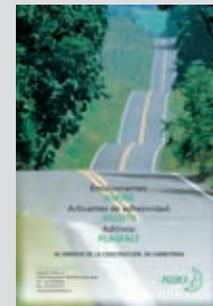
08210 Barberà del Vallès (Barcelona)

Tel: 937 399 300 Fax: 937 399 377

E-mail: kao@kao.es

Ámbito de actuación: Internacional

Facturación: de 60 ,11 a 300,51 M euros



Web

### SUMINISTROS / SUPPLIES

**Materias primas y aditivos /**  
**Raw materials and additives**

Productos químicos / *Chemicals*



## MECÁNICA CIENTÍFICA S.A.

Calle Fundidores 14, Pol. Ind. "Los Ángeles"

28906 GETAFE (Madrid) España

Tel: +34 91 696 21 15

Fax: +34 91 682 68 98

comercial@mecacisa.com

www.mecacisa.com

Ámbito de actuación / Area of operation:

Nacional / National - Internacional / International

Facturación / Invoicing:

Hasta 60 millones de Euros / Up to 60 millions of Euros



### SUMINISTROS / SUPPLIES

#### **Maquinaria y Equipos / *Machines and equipment***

Auscultación de firmes / *Pavement condition monitoring*

Compactadoras / *Compactors*

Control de calidad / *Quality control*

Evaluación de firmes / *Pavement assessment*

Geotécnia / *Geotechnics*

Laboratorio / *Laboratory*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS / WORK TECHNIQUES

#### **Control de calidad / *Quality control***

En obra / *In situ*

En laboratorio / *In the laboratory*

En planta / *In plant*

Ensayo de materiales / *Material testing*



## POSTIGO OBRAS Y SERVICIOS, S.A.

Juan de la Cierva, 9  
46940 Manises (Valencia)  
Tel: 961 545 141 Fax:961 533 372  
E-mail: [info@grupo-postigo.com](mailto:info@grupo-postigo.com)  
Capital Social: 1.806.000,00 euros  
Ámbito de actuación: Internacional  
Facturación: hasta 60 ,10 M euros



### SUMINISTROS / SUPPLIES

#### **Materiales / Materials**

Balizas / *Traffic guidance equipment*

Barreras / *Safety barriers*

#### **Seguridad Vial y Gestión de Tráfico / *Road safety and traffic management***

Balizamiento / *Traffic guidance systems*

Barreras antirruído / *Noise barriers*

Información variable / *Variable messages*

Pantallas antideslumbrantes / *Anti-glare screens*

Pórticos y banderolas /  
*Gantry and L - shaped girder signs*

Señalización horizontal / *Road marking*

Señalización vertical / *Road signs*

#### **Varios / Miscellaneous**

Mobiliario urbano / *Urban equipment*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS / WORK TECHNIQUES

#### **Construcción y conservación / *Construction and maintenance***

Conservación integral / *Maintenance by contract*

Estructuras / *Structures*

Pasarelas peatonales / *Footbridges*

Vías verdes y caminos naturales /  
*Green Routes and Natural Roads*

#### **Consultoría e Ingeniería / *Consulting and engineering***

Evaluación de la señalización /  
*Road sign evaluation*

Gestión de carreteras / *Road management*

Inventario de carreteras / *Road inventory*

Inventario de señalización / *Road signs inventory*

Proyectos de acondicionamiento /  
*Road improvement project*

Proyectos de estructuras de fábrica /  
*Engineering structure project*

#### **Medio ambiente / Environment**

Control de vegetación / *Vegetation control*

Impacto ambiental / *Environmental impact*

Medición de índices de ruido /  
*Sound level measurement*

Paisajismo / *Landscaping*

Plantaciones vegetales / *Planting*

Protección y revegetación de taludes /  
*Slope protection and planting*

Paneles antirruído / *Noise barriers*

**PROAS**  
*Betunes CEPSA*

**CEPSA PROAS,  
PRODUCTOS ASFÁLTICOS, S.A.**

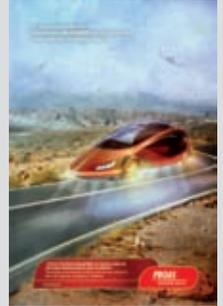
Av. Partenón, 12, 2ªC  
28042 Madrid

Tel: +34 91 337 60 00

Fax: +34 91 337 71 33

E-mail: [proas@cepsa.com](mailto:proas@cepsa.com)

Web: [www.proas.es](http://www.proas.es)



Web

## SUMINISTROS / SUPPLIES

### **Materiales / Materials**

Másticos para sellado de juntas /  
*Mastic asphalt for joint sealing*

Productos especiales de apoyo a la construcción /  
*Special products for the construction industry*

### **Materias primas y aditivos / Raw materials and additives**

Betunes asfálticos / *Bitumen*

Betunes asfálticos modificados /  
*Polymer - modified bitumens*

Emulsiones asfálticas / *Bitumen emulsions*

Emulsiones de betunes modificados /  
*Modified bitumen emulsion*



## PROBISA TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN S.A.

Gobelas, 25-27, 3ª plta.  
28023 La Florida (Madrid)

Tel: 917 082 954 Fax: 913 729 022

Ámbito de actuación: Nacional - Internacional  
Facturación: de 60 ,11 a 300,51 M euros



Web

1/2

### SUMINISTROS / SUPPLIES

#### **Maquinaria y Equipos / *Machines and equipment***

Laboratorio / *Laboratory*

Plantas de fabricación de betunes / *Bitumen plants*

Plantas de fabricación de emulsiones asfálticas /  
*Bitumen emulsion plants*

Evaluación de firmes / *Pavements evaluation*

#### **Materiales / *Materials***

Mezclas asfálticas en caliente / *Hot mixed asphalt*

Mezclas asfálticas en frío / *Cold mixed asphalt*

Mezclas asfálticas con ligantes modificados /  
*Asphalt with modified binders*

Mezclas drenantes / *Porous asphalt*

Producción de áridos / *Aggregates production*

#### **Materias primas y aditivos / *Raw materials and additives***

Aditivos para asfaltos / *Bitumen modifiers*

Betunes asfálticos / *Bitumen*

Betunes asfálticos modificados /  
*Polymer - modified bitumens*

Emulsiones asfálticas / *Bitumen emulsions*

Emulsiones de betunes modificados /  
*Modified bitumen emulsion*

Materiales granulares / *Granular materials*

Productos químicos / *Chemicals*

#### **Seguridad Vial y Gestión de Tráfico / *Road safety and traffic management***

Pavimentos especiales / *Specialised pavements*

#### **Varios / *Miscellaneous***

Libros / *Books*

Software para carreteras / *Road software*

### EJECUCIÓN DE TRABAJOS / *WORK TECHNIQUES*

#### **Construcción y conservación / *Construction and maintenance***

Conservación integral / *Maintenance by contract*

Consolidación de terrenos / *Soil consolidation*

Drenajes / *Drainage*

Estructuras / *Structures*

Fresado de pavimentos / *Pavement milling*

Impermeabilización / *Waterproofing*



2/2

Movimiento de tierras / *Earthworks*

Pavimentación con hormigón hidráulico / *Paving with portland cement concret*

Pavimentación con mezclas asfálticas en caliente / *Paving with hot mix asphalt*

Pavimentación con mezclas asfálticas en frío / *Paving with cold mix asphalt*

Pavimentación con mezclas de ligantes asfálticos modificados / *Paving with asphalt with modified binders*

Pavimentación con mezclas drenantes / *Paving with porous asphalt*

Pavimentación con mezclas hidráulicas / *Paving with hydraulic binder treated materials*

Perforación de túneles / *Tunneling*

Protección de taludes / *Slope protection*

Puentes / *Bridges*

Reciclado de pavimentos / *Pavement recycling*

Rehabilitación de puentes / *Bridge rehabilitation*

Restitución de servicios / *Services restoring*

Riegos asfálticos / *Surface coats and dressings*

Riegos con ligantes modificados / *Surface coats and dressings with modified binders*

### **Consultoría e Ingeniería / *Consulting and engineering***

Auscultación de firmes / *Pavement monitoring*

Evaluación de firmes / *Pavement evaluation*

Gestión de carreteras / *Road management*

Inventario de carreteras / *Road inventory*

Proyectos de acondicionamiento / *Road improvement project*

Proyectos de estructuras de fábrica / *Engineering structure project*

Proyectos de rehabilitación / *Rehabilitation project*

Proyectos de trazados / *Geometric design*

### **Control de calidad / *Quality control***

En obra / *In situ*

En laboratorio / *In the laboratory*

En planta / *In plant*

Ensayo de materiales / *Material testing*

### **Medio ambiente / *Environment***

Paisajismo / *Landscaping*

Plantaciones vegetales / *Planting*

Protección y revegetación de taludes / *Slope protection and planting*

Paneles antirruído / *Noise barriers*

### **Seguridad Vial y Gestión de Tráfico / *Road safety and traffic management***

Alumbrado público / *Road lighting*

Balizamiento / *Traffic guidance devices*

Barreras / *Safety barriers*

Pantallas antideslumbrantes / *Anti-glaring screens*

Pavimentos especiales / *Specialised pavements*

### **Otros / *Other***

Validación de diversos tipos de residuos / *Validation of different types of waste*



## REPSOL REPSOL LUBRICANTES Y ESPECIALIDADES S.A.

Méndez Álvaro, 44  
28045 Madrid (España)  
Tel: (34) 91 75 38 100 / (34) 91 75 38 000  
Fax: 902 303 145  
www.repsol.com



### SUMINISTROS / SUPPLIES

**Combustibles y lubricantes**  
*/ Fuels and lubricants*

Lubricantes */ Lubricants*

**Materias primas y aditivos**  
*/ Raw materials and additives*

Betunes asfálticos */ Bitumen*

Betunes asfálticos modificados  
*/ Polymer - modified bitumens*

Emulsiones asfálticas */ Bitumen emulsions*

Emulsiones de betunes modificados  
*/ Modified bitumen emulsion*

Productos químicos */ Chemicals*