

Calidad de las infraestructuras de carreteras



Adolfo Güell y José del Cerro, DGC,
Ministerio de Fomento.

Resumen

Con el fin de mejorar la calidad de las infraestructuras de carreteras, en España, entre los años 2002 y 2006, se ha realizado una profunda revisión en el campo no sólo normativo, sino también metodológico.

En este sentido, cabe destacar en primer lugar la revisión que se realizó en el año 2003 de la normativa de firmes y pavimentos. En esta revisión se optimizan las secciones estructurales de firme, adaptándolas a las condi-

ciones de tráfico actuales, así como la evolución tecnológica que se ha producido tanto de los materiales como de los sistemas constructivos.

Asimismo, en el año 2002, se aprobó la Orden Ministerial que contemplaba la utilización de suelos marginales (suelos expansivos, colapsables, con alto contenido en sales solubles, etc.) en obras de carreteras. El empleo de este tipo de materiales implica una utilización más racional de los recursos naturales, logrando un aprovechamiento óptimo de los materiales locales y reduciendo, por tanto, el impacto en las zonas atravesadas por las obras de carreteras.

En el año 2004 entró en vigor la Or-

den Circular sobre recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carreteras. Dicha Orden Circular establece los criterios básicos para el proyecto de drenajes subterráneos, definiendo las características de las unidades de obra de empleo más frecuente, así como los detalles y reglas de buena práctica que se deben tomar en consideración durante su construcción y posterior conservación.

En cuanto a las obras de fábrica, este Informe Nacional incluye un trabajo en el que se presenta una aplicación para evaluar el riesgo potencial de socavación en puentes sobre cursos de agua. Para ello se estable-

ce una metodología para realizar las inspecciones de puentes, así como los criterios para evaluar su vulnerabilidad frente a la acción socavadora del agua. La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento ha aplicado esta metodología a una campaña de inspecciones de 1818 puentes sobre cauces realizada entre los años 2000 y 2003, pertenecientes todos ellos a la Red de Carreteras del Estado.

El índice que se va a desarrollar dentro del Tema Estratégico IV *Calidad de las Infraestructuras de Carreteras* es el siguiente:

1.- “Novedades en materia de secciones estructurales y pavimentos” dentro del epígrafe 4.3.1: *Elección adecuada de los firmes y de las técnicas de carreteras*.

2.- “Nueva normativa española de drenaje profundo” dentro del epígrafe 4.3.3: *Reducción al mínimo de los impactos de las obras de carreteras en los medios que atraviesan*.

3.- “Novedades en la promoción y utilización de los materiales locales, residuales y marginales” dentro del epígrafe 4.5.1: *Promoción de la utilización óptima de los materiales locales*.

4.- “Evaluación del riesgo potencial de socavación en puentes sobre cursos de agua” dentro del epígrafe 4.4.2: *Evaluación del estado de las obras de fábrica en conexión con las metodologías de gestión de los activos*.

1. Novedades en materia de secciones estructurales y pavimentos

En España en los años 2002-2006 han aparecido una serie de novedades muy significativas en materia de firmes de carreteras, especialmente en lo que se refiere a secciones estructurales, a materiales usados y al empleo de reciclado en las obras de rehabilitación.

Las experiencias acumuladas de las obras realizadas en España en los últimos años aconsejaron la redacción de las Normas 6.1.I.C. y 6.3.I.C. (que entraron en vigor el 13-12-03).



Viaducto de Ribadavia (Ourense), A-52.

La Norma 6.1.I.C. recoge por un lado las nuevas secciones estructurales de firme, adaptándolas a las condiciones de tráfico existentes en España, y a la evolución tecnológica de los materiales y sistemas constructivos para la pavimentación de carreteras.

Entre las modificaciones que en dicha Norma se incluyeron se destacan las siguientes:

- Con objeto de optimizar las secciones de firmes que proyectar, se ha realizado una distribución más exhaustiva en las categorías de tráfico pesado. En este sentido se ha considerado una nueva categoría de tráfico de vehículos pesados, la T00 (más de 4000 vehículos pesados/carril día), para recoger el aumento de tráfico de pesados que ha tenido lugar en la Red de Carreteras Española. Asimismo, se ha dividido en dos subcategorías las categorías de tráfico pesado T3 (entre 50 y 200 vehículos pesados/carril día) y T4 (menor de 50 vehículos pesados/carril día), para una mejor adaptación de las secciones de firmes a la realidad de los tráficos en carreteras con reducido tráfico pesado.

- Se apostó por la obtención de explanadas con mayores garantías en cuanto a uniformidad estructural, durabilidad e insensibilidad frente a la acción del agua, adoptando un pará-

metro de determinación de la categoría de explanada más exigente (módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga), y generalizando el empleo de estabilizaciones de suelos con conglomerantes hidráulicos para la obtención de explanadas. En este sentido, para las explanadas de mayor calidad, tipo E3, se exige que ésta sea estabilizada con conglomerantes hidráulicos.

- Se ha reducido el número de secciones estructurales posibles. Asimismo, las nuevas secciones estructurales han supuesto un aumento significativo de la durabilidad y vida útil respecto de las precedentes.

- Desaparecen de las secciones de firme las zahorras naturales como subbase. Esta desaparición está motivada por dos razones: por su escaso aporte estructural y por cuestiones medioambientales.

- Se incorporaron nuevos materiales en el diseño de los firmes, entre los que destacan las mezclas bituminosas de alto módulo para capas de base y las mezclas bituminosas de granulometría discontinua en caliente para capas de rodadura.

- Dentro de los firmes rígidos se estableció la obligatoriedad de emplear pavimentos continuos de hormigón armado para las categorías de tráfico

HUSOS GRANULOMÉTRICOS, CERNIDO ACUMULADO (% en masa)							
TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)						
	12,5	10	8	4	2	0,500	0,063
M8	-	100	75-97	14-27	11-22	8-16	5-7
M10	100	75-97	-	14-27	11-22	8-16	5-7
F8	-	100	75-97	23-38	18-32	11-23	7-9
F10	100	75-97	-	23-38	18-32	11-23	7-9

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz 4 mm de la UNE-EN 933-2 y es retenida por el tamiz 2 mm de la UNE-EN933-2, será inferior al ocho por ciento (8%).

Tabla 1. Husos granulométricos.

pesado T00 y T0 (mayor que 2000 vehículos pesados/carril día).

La Norma 6.3.I.C. establece los criterios básicos que hay que considerar en los proyectos de rehabilitación de firmes, buscando que tras la rehabilitación el firme tenga la estructura y características que tendría si fuera nuevo. La norma 6.3 I.C., en su apartado 7.4., hace referencia a los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado. Asimismo, se establece en dicha instrucción que, en aquellas actuaciones de rehabilitación de firmes cuya superficie sea mayor de 70 000 m², se deberá tener en cuenta (fundamentalmente por cuestiones ambientales y económicas) el reciclado de firmes en el análisis de soluciones para el proyecto de rehabilitación del firme de la carretera.

El 18 de enero de 2002 entró en vigor la Orden Circular 8/2001 "Reciclado de firmes". Dicha Orden Circular fue consecuencia de las experiencias obtenidas en las obras de reciclado ejecutadas en España en la década de los noventa. En función de la tipología de las secciones estructurales de los firmes y pavimentos, así como de sus deterioros, se elige la técnica de reciclado: reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas, reciclado in situ con cemento de capas de firme o reciclado en central en caliente de capas bituminosas.

Debido a la importancia que han tenido, a continuación se desarrollarán dos de las novedades más significativas que han tenido lugar en España en estos años como son: las mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura y los suelos estabilizados in situ para for-

mación de explanadas.

1.1. Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura

Las mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura se recogen en el artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), que fue aprobado con fecha de 01-03-2004.

Se definen como aquellas mezclas cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos que presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante.

En España, la Norma distingue dos tipos de mezclas (F y M) con dos husos granulométricos con tamaño máximo nominal de ocho y diez milímetros cada uno y espesores de las capas de rodadura de 2 y 3 cm respectiva-

mente. La Norma establece el uso de las mezclas discontinuas tipo M para los tramos de carretera con tráfico de pesados superior a 800 vehículos/carril día.

Estas capas de rodadura se utilizan, en general, para carreteras con tráfico elevado, exigiendo la norma española que en estos casos el ligante hidrocarbonado sea un betún modificado.

Entre las características más reseñables de estas mezclas se encuentran las *tablas 1 y 2*:

1.2. Suelos estabilizados para formación de explanadas

La Norma 6.1 IC, a efectos de definir la estructura del firme, establece tres categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga ($E_{1/2}$), obtenido de acuerdo con la NLT-357 "Ensayo de carga con placa", cuyos valores mínimos se recogen en la *tabla 3*.

Para la formación de explanadas la norma recomienda al ingeniero proyectista, por razones de durabilidad y uniformidad de la capacidad estructural en toda la traza, la consideración preferente de los suelos estabilizados in situ, con cal o cemento, frente a una aportación directa de suelos sin tratar. Para la formación de las explanadas de mayor calidad, tipo E3, la norma establece que su

TIPO, COMPOSICIÓN Y DOTACIÓN DE LA MEZCLA				
CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEZCLA			
	M8	M10	F8	F10
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m²)	35-50	55-70	40-55	65-80
DOTACIÓN MINIMA (*) DE LIGANTE (% en masa sobre el total del árido seco, incluido el polvo mineral)	5		5,5	
LIGANTE RESIDUAL EN RIEGO	Firme nuevo	> 0,3		> 0,25
DE ADHERENCIA (kg/m²)	Firme antiguo	> 0,4		> 0,35

(*) Incluidas las tolerancias especificadas en el apartado 543.9.3.1. Se tendrán en cuenta las correcciones por peso específico y absorción de los áridos, si son necesarias.

Tabla 2. Características generales

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E ₁	E ₂	E ₃
E_{1/2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Tabla 3. Categorías de explanada.

capa de coronación se formará con suelos estabilizados salvo para el caso de explanaciones en roca.

Las prescripciones para la formación de suelos estabilizados in situ se recogen en el Artículo 512 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) que fue aprobado con fecha de 01-03-2004.

Los suelos estabilizados se definen como la mezcla homogénea de un suelo con cal o con cemento y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual, convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas.

Según sus características finales, la norma española establece tres tipos de suelos estabilizados in situ, denominados respectivamente S-EST 1, S-EST 2 y S-EST 3. Los dos primeros se pueden conseguir con cal o cemento, mientras que el tercer tipo se tiene que realizar necesariamente con cemento.

Las condiciones que deben cumplir dichos suelos estabilizados vienen recogidas en el artículo 512 antes mencionado, según el tipo de suelo y la categoría de explanada que se pretende conseguir; y las incluimos en la tabla 5.

2. Nueva normativa española de drenaje profundo

España presenta fuertes contrastes pluviométricos entre sus regiones; mientras que en el noroeste peninsular la precipitación media anual puede llegar a superar los 2200 mm/año, en el sureste apenas alcanza los 300 (relación 1:7), existiendo incluso estaciones meteorológicas que registran menos de 130, lo que, con casi total certeza, supone el valor medio más bajo de la Europa continental.

Por otra parte, la distribución temporal del régimen pluviométrico es sumamente irregular; pues, mientras que en unas zonas del país el número medio de días con precipitación (supe-

rior a 1 mm/día) apenas alcanza los 50 días/año, en otros supera los 190 (relación 1:4).

El número medio anual de horas de sol despejado oscila según la región entre 1500 y 2900 h/año, lo que supone una relación de 1:2. En cuanto al régimen de heladas la situación es aún más extrema: así, en la costa sur, el número medio de días de helada se encuentra entre 0 y 2 días/año, y en determinadas zonas del interior se superan los 120.

La Red de Carreteras del Estado discurre por todas estas zonas, enmarcándose, como se acaba de indicar, en unas coordenadas climáticas sumamente variables, que afectan a las condiciones en que se produce el drenaje subterráneo de las mismas.

A principios de 2004 entró en vigor la Orden Circular 17/2003 "Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera", que incluye prescripciones básicas relativas al proyecto, construcción y conservación de las carreteras estatales, pretendiendo ser útil para la totalidad de dicha red. Para ello y en determinados aspectos, ha sido preciso dividir el país en regiones relativamente homogéneas, a efectos de distribución de las variables climáticas apuntadas.

Teniendo presentes en todo momento los condicionantes anteriormente expuestos, el documento se aplica a las carreteras estatales que disponen de alguno de los firmes incluidos en la nueva norma de Secciones de firme (2003), excluyendo el drenaje de los túneles, el de las estructuras y el de los trabajos geotécnicos específicos (técnicas de mejora del terreno, pantallas de impermeabilización, etc.).

La nueva norma pretende el establecimiento de criterios básicos para el proyecto del drenaje subterráneo, define las características de las unidades de obra de empleo más frecuente en dicho campo y establece cuestiones que pueden abordarse desde el proyecto, tocantes a aspectos relativos a construcción y conservación.

2.1. Necesidad y planeamientos básicos

La necesidad del drenaje subterráneo de las carreteras se fundamenta en el hecho de que el incremento de la humedad en los materiales que constituyen las capas del firme y las explanaciones suele llevar asociada una disminución de su capacidad de soporte, y puede dar lugar a fenómenos físico-químicos que modifiquen su estructura y comportamiento de modo perjudicial: erosión, meteorización, disolución, expansión, colapso, etc.

Estas cuestiones resultan hoy en día más importantes, si cabe; pues, desde la publicación en 2002 del nuevo Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) relativo a explanaciones, drenajes y cimentaciones, y con el fin de aprovechar al máximo los materiales locales, se permite, en determinadas circunstancias, el uso de los denominados materiales marginales, que suelen resultar sensibles al agua (suelos expansivos, solubles, etc.).

Para tratar de evitar los problemas citados, la norma parte de una serie de planteamientos básicos:

- Drenaje de las capas del firme y elementos que conforman la plataforma de la carretera:

- Se debe tratar de evitar la penetración de agua superficial por infiltración a través de calzada, arcenes, bermas, medianas y elementos singulares, para impedir que aumente la humedad de las capas del firme.

- Es preceptivo el tratamiento de medianas, bermas y eventuales arcenes sin pavimentar, al objeto de impedir, o al menos disminuir, la infiltración de agua por ellos.

- Debe facilitarse la evacuación del agua que, por cualquier circunstancia, se hubiera podido infiltrar.

- Drenaje de las explanaciones (rellenos y desmontes):

- Las explanaciones deben estar protegidas de aportes de aguas subterráneas.

- La explanada debe estar a la mayor distancia posible del nivel freático. Los valores mínimos se fijan en

SÍMBOLO	DEFINICIÓN DEL MATERIAL	ARTÍCULO DEL PG-3	PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS
IN	Suelo inadecuado o Marginal	330	- Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2 - $CBR \geq 3$ (*).
0	Suelo tolerable	330	- Contenido en materia orgánica $< 1\%$ - Contenido en sulfatos solubles (SO_2) $< 1\%$. - Hinchamiento libre $< 1\%$.
1	Suelo adecuado	330	- $CBR \geq 5$ (*) (**)
2	Suelo seleccionado	330	- $CBR \geq 10$ (*) (**)
3	Suelo seleccionado	330	- $CBR \geq 20$ (*)
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ	612	- Espesor mínimo: 25 cm.
S-EST 2	con cemento		- Espesor máximo: 30 cm.
S-EST 3	o con cal		

(*) El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para al aceptación o rechazo de los materiales utilizados en las diferentes capas de acuerdo con la figura 1.

(**) En la capa superior de las empleadas para la formación de la explanada el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, en $CBR \geq 6$ y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un $CBR \geq 12$. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una explanada de categoría E_1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E_2 sobre suelo tipo 2.

Tabla 4. Clasificación de suelos.

ESPECIFICACIONES DEL SUELO ESTABILIZADO IN SITU					
CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMATIPO DE SUELO ESTABILIZADO			
			S-EST1	S-EST2	S-EST3
CONTENIDO DE CAL O DE CEMENTO	% EN MASA DEL SUELO SECO		≥ 2		≥ 3
ÍNDICE CBR, a 7 días (*)	----	UNE 103502	≥ 6	≥ 12	
COMPRESIÓN SIMPLE, a 7 días (*)	MPa	NLT - 305	---	---	$\geq 1,5$
DENSIDAD (Proctor modificado)		UNE 103501	≥ 95 (**)	≥ 97	≥ 98

(*) Para la realización de estos ensayos, las probetas se compactarán, según la NLT-310, con la densidad especificada en la fórmula de trabajo.

(**) Para la capa de coronación de la categoría de explanada E_1 definida en la Norma 6.1 IC de Secciones de firme, este valor será del noventa y siete por ciento (97%).

Tabla 5. Suelos estabilizados in situ.

las nuevas normas de *Secciones y Rehabilitación de firmes* (2003), en función del tipo de materiales que constituyen el terreno de apoyo.

Una vez enunciados los planteamientos teóricos de partida, la norma aborda la cuestión con un *enfoque práctico*, basado en buena medida en la observación de la problemática de las carreteras en servicio.

2.2. Breve resumen del contenido

Entre los *criterios de proyecto* se incluyen las siguientes cuestiones:

- Evitar al máximo la *infiltración vertical*: Se introducen aspectos complementarios a la nueva norma de secciones del firme sobre sellado de juntas en pavimentos de hormigón; se abordan cuestiones relativas a las características de los materiales que dis-

poner en medianas y bermas sin revestir, etc.

- Análisis de la posibilidad de *infiltración horizontal* (o lateral): Se desarrollan cuestiones relativas a su posible consideración y medidas para tratar de paliarla.

- *Evacuación de las aguas* que hubieran podido infiltrarse: La asunción de partida es la impermeabilidad de los pavimentos; no obstante lo cual, se disponen medidas que aseguren la evacuación en caso de que hubiese infiltración.

Se establece un modelo teórico del recorrido del agua que hubiera podido infiltrarse por cualquier circunstancia en la sección transversal. Este modelo de comportamiento supone la infiltración vertical hasta que se alcance una capa de baja permeabilidad, sobre la que se pueda suponer

flujo subhorizontal. Si todas las capas atravesadas fueran suficientemente permeables, el flujo vertical continuaría hasta encontrar un material más impermeable en profundidad.

Partiendo del catálogo de secciones de firme de la nueva norma española y siguiendo el planteamiento teórico recién indicado, se estudian, para cada una de las secciones transversales tipo de la carretera, los posibles recorridos de las aguas infiltradas tanto vertical como subhorizontalmente.

Para ello, se establecen tres posibles casos (F , E , S), que se denominan en función de la inicial (firme, explanada, suelo) del nombre de la capa por la que se supone que discurre la mayor parte de las aguas infiltradas.

Estos tres casos deben seleccionarse a partir de un *diagrama de flujo* basado en criterios de contraste de

permeabilidades (matizados en ciertos casos con aspectos climáticos) entre las capas que constituyen la sección transversal de la carretera. En la figura 2 reproducimos el aspecto de este diagrama esquemáticamente.

Una vez determinado, de entre los tres posibles, el caso de aplicación, deberá seguirse el recorrido teórico de las aguas que hubieran podido infiltrarse en la sección transversal, comprobando que no se producen acumulaciones o retenciones de agua y que no discurren por suelos o rocas que, a partir de los criterios establecidos en la nueva versión del PG-3 sobre explanaciones, drenajes y cimentaciones (2002), deban considerarse marginales o inadecuados.

Además, se establecen una serie de criterios geométricos que pretenden favorecer el flujo lateral de salida y dificultar el de entrada.

A continuación, el documento aborda lo relativo a las diferentes *tipologías de drenes y sus ubicaciones* más típicas, incidiendo en que no deben verse aguas de escorrentía o drenaje superficial en los elementos o sistemas específicos de drenaje subterráneo, por existir normalmente diferencias de varios órdenes de magnitud en los caudales que circulan por unas y otras, a lo que debe añadirse la dificultad que suele suponer la inspección y reparación, a posteriori, de dichos elementos.

Una posible clasificación de los drenes que se proponen viene determinada por su ubicación, distinguiendo entre los de pie de desmonte, mediana y márgenes, así como por dos casos especiales: para pavimentos de hormigón y para captación de flujos longitudinales, los cuales presentan una problemática muy específica, que la norma desarrolla con mayor detalle.

– En relación con el *drenaje de las explanaciones* (rellenos y desmontes), se establece la necesidad de los reconocimientos hidrogeológicos previos a la ejecución de las obras y se trata por separado lo relativo a la proximidad del nivel freático y al denominado drenaje de estabilización, íntima-

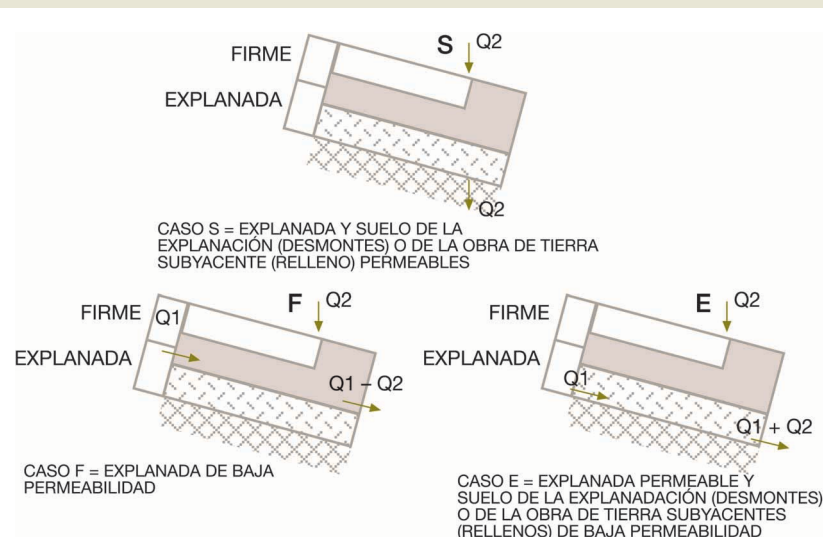


Figura 1. Casos de drenaje de explanadas.

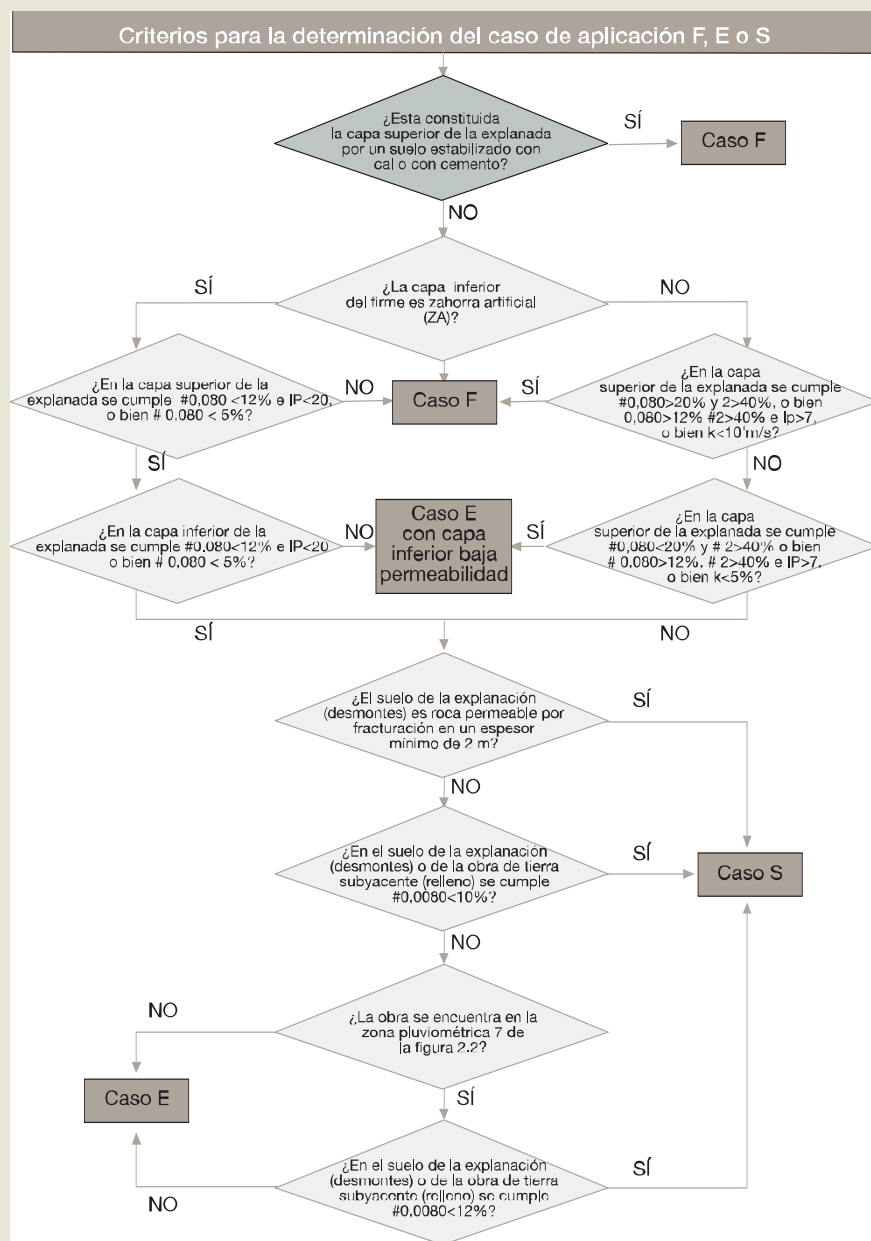


Figura 2. Diagrama de flujos.

mente ligado al comportamiento geotécnico de las explanaciones.

– También se formulan criterios relativos al cálculo de *tuberías drenantes*, distinguiendo entre que éstas se encuentren o no por encima del nivel freático y se abordan algunas cuestiones sobre el drenaje subterráneo de los denominados *elementos singulares*: canalizaciones para servicios y lechos de frenado.

– Se aborda además el fenómeno de la *helada*, definiendo para ello, sobre una serie de mapas, tres regiones geográficas denominadas H1 a H3. En cada una de estas regiones se establece una profundidad de penetración de la helada, dentro de la cual no deben disponerse materiales susceptibles al hielo; además se prescriben profundidades mínimas para los *elementos de drenaje subterráneo* en cada una de estas zonas.

Se incluye posteriormente un capítulo, enfocado como catálogo abierto, en el que se indican las principales características y requisitos básicos que satisfacer por los elementos de drenaje subterráneo de más frecuente aparición en las obras de carretera.

Se contemplan de manera específica: zanjas, pantallas, filtros y tuberías drenantes; colectores, arquetas y pozos de registro; láminas impermeables; mantos, tacones y contrafuertes drenantes; drenes californianos, de interceptación y en espina de pez; así como pozos, galerías de drenaje y trabajos geotécnicos específicos. Además, se indican las cuestiones que debe contemplar el proyecto cuando el elemento en cuestión se encuentre fuera de la relación anterior.

Posteriormente, en el capítulo dedicado a *construcción y conservación*, se llama la atención sobre los aspectos que deben tenerse en cuenta en el proyecto y que se consideran más significativos para el adecuado funcionamiento de los sistemas de drenaje subterráneo durante la construcción y explotación de una carretera, que normalmente son detalles y reglas de buena práctica de cumplimiento sencillo.

Por último, para cerrar la norma, se

incluyen una serie de *apéndices* que comprenden un total de cincuenta detalles de drenaje subterráneo aplicables al proyecto de secciones transversales tipo, dependiendo del caso de aplicación para la evacuación de las aguas infiltradas (F, E, S): de si el detalle es relativo a desmonte, relleno o mediana; y de si la pendiente de la calzada es favorable o no al vertido hacia el sistema propuesto. Estos detalles se acompañan de una serie de notas adicionales, relativas a cuestiones variopintas: posible disposición de tierra vegetal en ciertas zonas de la sección, espesores mínimos de determinadas capas granulares, necesidad de revestimiento de cunetas, etc.

3. Novedades en la promoción y utilización de los materiales locales, residuales y marginales

El Boletín Oficial del Estado del 11 de junio de 2002 publicó la Orden FOM/1382/02 por la que se actualizaron determinados artículos del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.

Los artículos, 330 Terraplenes, 331 Pedraplenes y 333 Rellenos todo-uno, introducen por primera vez en Espa-

ña el concepto de *materiales marginales*, entendiendo como tales los que, sin poder utilizarse directamente en la ejecución de obras de carretera, son susceptibles de empleo en ciertas zonas de los rellenos, siempre que un estudio específico para cada circunstancia concreta, determine la viabilidad de su uso, definiendo cuántas prescripciones sean necesarias para dicho uso.

El empleo de este tipo de materiales implica una utilización más racional de los recursos naturales, reduciendo los impactos en las zonas atravesadas por las obras y un aprovechamiento óptimo de los materiales locales –preferiblemente de la propia traza–, que en otras circunstancias serían desechados.

En esta nueva normativa introducida en 2002, los rellenos se zonifican en: cimienta, núcleo, coronación, espaldones y zonas especiales en su caso, requiriéndose prescripciones diferentes para cada una de ellas; y se detallan las características que hacen que un material tipo *suelo*, o *roca*, sea considerado como marginal.

Para los suelos, estas propiedades se encuentran ligadas a condiciones de plasticidad, contenido de materia orgánica, de sales solubles, expansividad, colapsabilidad, e índice CBR para las condiciones de compactación de puesta en obra.

En la *figura 3* y en la *tabla 6* se re-

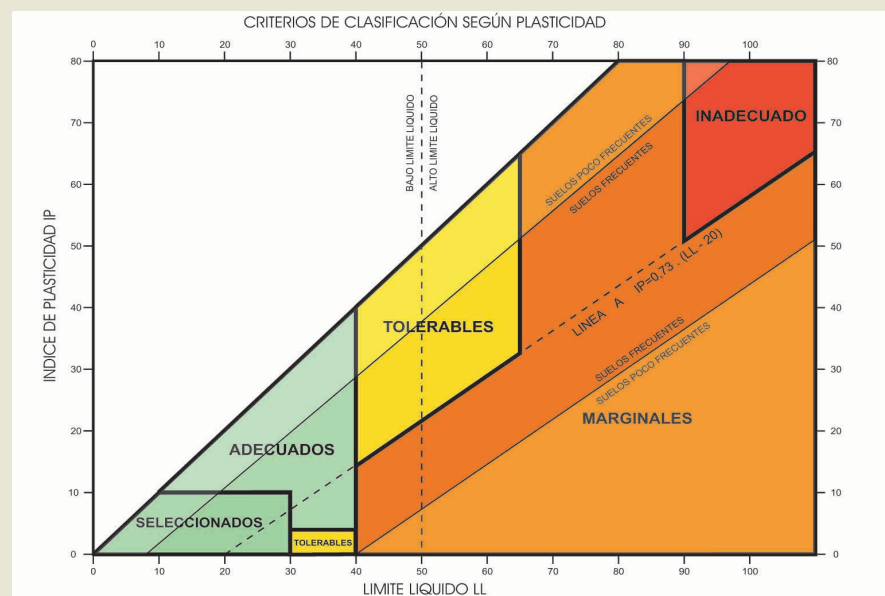


Figura 3. Clasificación de los suelos por plasticidad.

cogen los criterios para la clasificación de materiales tipo *suelo* en la Orden FOM/1382/02.

En cuanto a las rocas, sus características minerales específicas son, la estabilidad frente al agua y la inadecuación de forma, que pueden llegar a determinar su carácter de marginales.

La utilización de los materiales marginales tan sólo es admitida en el núcleo de los rellenos, siendo un requisito necesario para su uso la realización de un *estudio especial*, que debe ser aprobado por el Director de las obras, el cual debe contemplar, entre otros, los siguientes aspectos:

- Determinación de las propiedades que confieren al suelo el carácter marginal.
- Estudio del comportamiento de dichas propiedades en el uso que se vaya a dar al material.
- Estudio que justifique la resistencia del conjunto y los asientos totales y diferenciales esperados, haciendo referencia a su evolución en el tiempo.
- Disposiciones constructivas y prescripciones técnicas que se deben adoptar para el uso al que se destina el material.

Lógicamente estas exigencias deben justificarse mediante una campaña de investigación suficientemente representativa.

Entre los suelos marginales más habituales, se encuentran los colapsables, los expansivos, los suelos con materia orgánica, yesos u otras sales solubles.

De entre las posibles actuaciones que permiten el uso de materiales marginales, destacan, como más significativas, por su número e importancia en España, las siguientes:

- Utilización de materiales con un elevado contenido en sales solubles, sobre todo núcleos de terraplenes contruidos con materiales yesíferos (no en vano, nuestro país es el tercer productor mundial de este mineral con fines comerciales, y amplias zonas del territorio lo contienen en cantidades apreciables), en los que se prima el aislamiento de los mismos frente a la acción de la intemperie, aguas subte-

SELECCIONADOS	ADECUADOS	TOLERABLES	MARGINALES
< 0,2%	< 1%	< 2%	apdo. 330.4.4.5
< 0,2%	< 0,2%	YESO < 5% OTRAS < 1%	apdo. 330.4.4.3 apdo. 330.4.4.4
-----	-----	< 3%	< 5% apdo. 330.4.4.2
-----	-----	<1%	apdo. 330.4.4.1
≥ 100	≥ 100	-----	-----
# 2 < 80% #0,4 < 75%	# 2 < 80%	-----	-----
< 25%	< 35%	-----	-----
#	SEGÚN GRÁFICO ADJUNTO		-----

(*) en caso de cumplir la condición indicada, se está exento del resto de las comprobaciones de granulometría y plasticidad
 #n = A% porcentaje en peso que pase por tamiz n UNE
 (#n = N° de tamiz de la serie UNE)

Tabla 6. Clasificación española de los suelos.

rráneas y sistemas de drenaje de la carretera, normalmente mediante el empleo de láminas sintéticas de impermeabilización, encamisado de tuberías, etc.

- Aprovechamiento de suelos que combinan valores altos de plasticidad y expansividad con baja capacidad de soporte (medida a través del índice CBR), en los que las estabilizaciones, principalmente con cal, están ocupando un papel relevante.

- Otros casos, más puntuales, tienen como protagonistas el empleo de subproductos procedentes de manipulación humana, rocas inestables frente a la acción del agua, etc.

En suma, la apuesta española por el estudio empleo racional de los materiales marginales es clara y decidida, procurando un aprovechamiento óptimo de los materiales locales que redunde en un mayor respeto al medio ambiente, todo ello cumpliendo unos rigurosos criterios y controles de calidad.

A continuación, se recogen dos actuaciones, una de empleo de materiales yesíferos en terraplenes y otra sobre una estabilización de un suelo de alta plasticidad, con cal.

- El *Cuarto Cinturón* de Zaragoza, constituye una autopista de circunvalación de la capital aragonesa (que en 2008 acogerá la Exposición Universal). La ciudad se asienta sobre la cuenca del río Ebro, en la que predominan los

materiales evaporíticos de edad terciaria, fundamentalmente yesos.

Una de las primeras aplicaciones de la nueva normativa fue la ejecución de unos 14 km de núcleo de terraplén de 10 m de altura media y 36 m de anchura en coronación, con yesos procedentes de la propia traza, que fueron confinados mediante la disposición de láminas impermeabilizantes y ejecución de espaldones confinantes sin misión estructural, de 3,50 m de anchura.

- Otro caso que en estos momentos se encuentra en ejecución se localiza en las inmediaciones de la ciudad de Gerona, muy próximo al aeropuerto, donde se están utilizando (para la construcción de un tramo de autovía de unos 6 km de longitud, toda ella en terraplén con una altura media en torno a los 5 m) unas arcillas plásticas locales con hinchamientos libres cercanos al 3%, e índice CBR < 3 en todos los casos.

Se ha optado por la estabilización in situ con adición de un 2% de cal, obteniéndose por el momento unos resultados enteramente satisfactorios.

4. Evaluación del riesgo potencial de socavación en puentes sobre cursos de agua

La función primordial de un puente es la de dar continuidad a la ca-

retera, salvando, para ello, los obstáculos naturales o artificiales que se encuentren en su trazado. Esta obvia cobra especial relevancia si el obstáculo que salvar es un cauce fluvial. Hay que considerar que, en el caso de los cursos de agua, su equilibrio dinámico se ve afectado no sólo por la interacción del hombre con acciones directas –construcción de presas, extracción de áridos, invasión del cauce, etc.–, sino también de manera indirecta por los cambios en el balance hidrológico de la cuenca de aportación, fundamentalmente debidos a la variación en los usos del suelo. Entonces, la respuesta del cauce para recobrar su equilibrio consiste en adquirir una pendiente de equilibrio que le proporcione la energía mínima necesaria para transportar la carga. Este fenómeno natural se consigue mediante la erosión, el transporte y la sedimentación.

En el escenario de los puentes, el proceso de erosión es un aspecto relevante en tanto en cuanto el restablecimiento del equilibrio dinámico del cauce puede ser un factor de vulnerabilidad para el puente, asociado fundamentalmente a fenómenos de socavación de sus cimentaciones.

Bajo estas consideraciones, parece lógico pensar que la evaluación de la seguridad de un puente no sólo depende de sus condiciones estructurales, sino que existe cierto grado de vulnerabilidad en el cauce que salva. La cuestión es: ¿cómo se puede estimar el riesgo en la interacción cauce-puente? La primera respuesta inmediata parece que puede partir de realizar una inspección del cauce que permita registrar las variables que pueden hacer vulnerable el puente en relación al cauce. Para ello se hace necesario estimar objetivamente el riesgo potencial de colapso del puente, frente a una avenida extraordinaria, atendiendo a la hidráulica fluvial, basándose en parámetros geomorfológicos del cauce y en la propia hidráulica del puente. Indudablemente los grados de libertad y las incertidumbres que pueden recogerse de estos parámetros son elevadas, por

cuanto la propia dinámica del cauce no permite, como en el caso del puente, establecer criterios sistemáticos que otorguen exactitud en la inspección. Además, puede ser que en el momento de la inspección no se hayan manifestado signos (socavaciones ligeras, leves descalces, depósitos de acarreo,…) que puedan indicar de forma evidente que existe riesgo. Esto nos lleva a considerar, en la evaluación del conjunto puente-cauce, un riesgo potencial y no un riesgo cierto, gobernado por las relaciones cualitativas y cuantitativas entre todas las variables que se consideren.

Todo esto parece muy prometedor; pero ¿es técnicamente viable y suficientemente fiable?

Al objeto de contestar a esta pregunta (pero, sobre todo, de resolver el problema de la evaluación del riesgo potencial de socavación de los puentes sobre cursos de agua) se ha desarrollado una metodología de inspección del puente y de su entorno y se han definido unos criterios para poder cuantificar dicho riesgo.

4.1. Metodología para la inspección del puente y su entorno

La primera tarea que se debe realizar para estudiar la vulnerabilidad del puente frente al cauce que salva es desarrollar una minuciosa inspección de éste en el entorno más inmediato

del puente. Basándose en nuestra experiencia, es razonablemente válido un alcance de cuatro veces la longitud del puente, aproximadamente, hacia aguas arriba y hacia aguas abajo.

La evaluación del riesgo potencial frente a una avenida se desarrolla basándose en dos parámetros: vulnerabilidad del puente y geomorfología del cauce. Estos dos descriptores engloban gran cantidad de registros que, bajo un algoritmo de cálculo, permiten establecer la condición de riesgo, en forma numérica.

4.1.1. Vulnerabilidad del puente

La vulnerabilidad del puente viene determinada por los posibles efectos de socavación local de la subestructura. Los parámetros que se enmarcan en este descriptor son exclusivamente relativos a la implantación del puente y a las características de su cimentación. Así, en las Inspección se deben observar los siguientes aspectos.

a) *Existencia de socavaciones por contracción del cauce o por interposición de obstáculos al flujo del agua.*

El riesgo potencial se manifiesta en forma de socavación, bien sea local, al pie de estribos y pilas, o bien en toda la sección transversal, debido a la contracción del cauce por interposición de la estructura.

Si los estribos están implantados dentro del cauce, se produce una re-

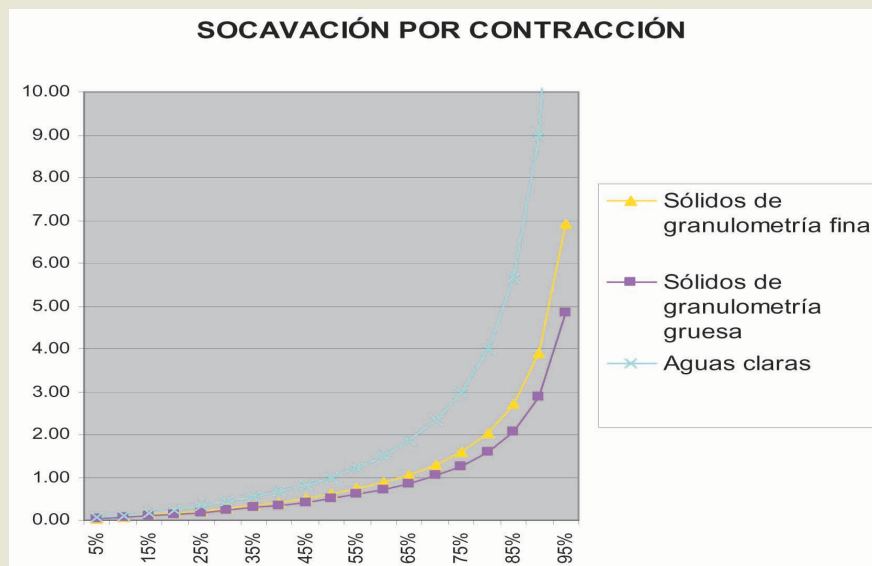


Figura 4 A. Variación profundidad de socavación en función del porcentaje de sección contraída.

ducción de la sección que produce una concentración de flujo, provocando un fenómeno de erosión por contracción. Este efecto se puede estimar con la ley de Laursen. Su cálculo no es objeto ni de este artículo ni de la inspección de cauce propuesta; aunque, a título informativo, se presenta un gráfico que representa la variación de la profundidad de socavación en función del porcentaje de sección contraída (figura 4A).

b) Orientación de las pilas

Por otra parte, la orientación de pilas y estribos en relación al flujo, la forma del frente de ataque y el número de fustes, único o múltiple, son parámetros que influyen notablemente en las condiciones de vulnerabilidad frente a riesgos de socavación local al pie de la subestructura.

En la figura 4B se puede observar la incidencia de la orientación de los estribos con respecto al flujo, en la erosión, según un estudio experimental en régimen uniforme y bajo las mismas condiciones hidráulicas. La figura 5 muestra de forma cualitativa la forma de las fosas de socavación generadas en una pila orientada en la misma dirección que el flujo y en otra, con un determinado ángulo de ataque.

c) Tipo de cimentación

El tipo de cimentación, profunda o directa, así como el material del substrato competente, son, igualmente, parámetros que tener en cuenta. Un puente con cimentación de pilotes puede haber sufrido un descalce por socavación y no resultar potencialmente peligroso, si en el proyecto se tuvieron en cuenta estas condiciones (figura 6).

d) Examen de las fosas de socavación

Este efecto puede resultar demoleedor, sin embargo, en cimentaciones directas o con pilotes de escasa longitud, o con un substrato poco competente tipo aluvial o similar. Especial atención merece el hecho de que durante una avenida extraordinaria la fosa de socavación alcanza su máximo exponente; pero, una vez reestablecido el régimen uniforme del río, esta

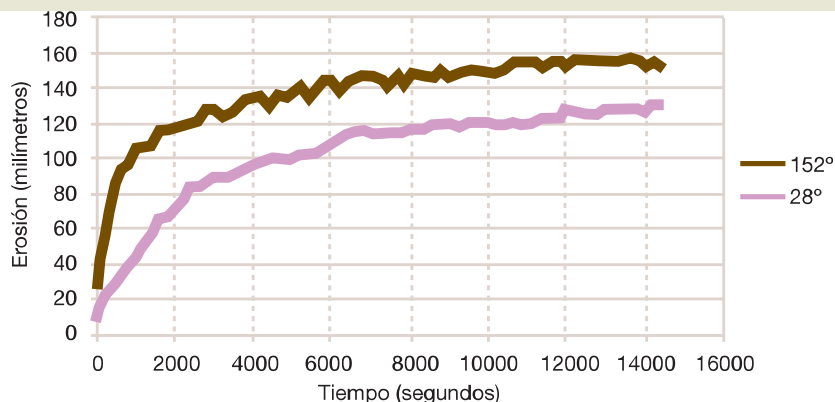


Figura 4 B. Profundidad de socavación en estribos en función del ángulo de ataque.

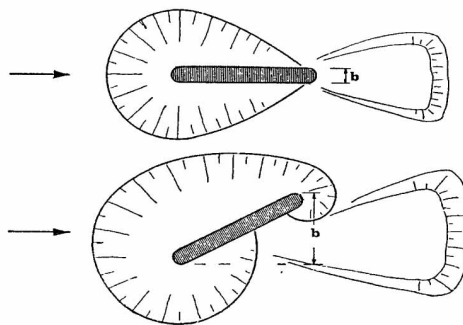


Figura 5. Influencia del ángulo de ataque en la socavación de pilas.

fosa puede acumular sedimentos y enmascarar parcialmente la profundidad real de la socavación.

e) Otros factores

Existen otros parámetros influyentes en la socavación de la subestructura, pero difícilmente cuantificables

en una inspección visual. Unos dependen de las propiedades del fluido, densidad, viscosidad, etc.; otros, de las características del flujo, velocidad, calado; y otros, de las propiedades del lecho, tales como pendiente y granulometría del sedimento. Ninguno de estos parámetros se registra en el escenario de las inspecciones propuestas; pero es necesario que el inspector conozca todos los factores influyentes.

4.1.2. Geomorfología del cauce

Este descriptor evalúa realmente el estado de equilibrio del cauce merced a parámetros geomorfológicos. Así, se deben registrar en la inspección los siguientes aspectos:

- La existencia de barras o islas, obstrucciones o acumulaciones de acarreo que dan indicios del comportamiento del río en régimen de avenida.
- El tipo de cauce, rectilíneo, trenzado, anastomosado, meándrico, torrencial...; el material del lecho y de las márgenes (figura 7), que indican el



Figura 6. Socavación profunda.

grado de estabilidad del cauce.

- Las protecciones y su estado de conservación que permiten discriminar ciertos riesgos de erosión.

- La existencia de afluentes o confluencias que permiten tener en cuenta el aumento de caudal y la sobrelevación de la lámina de flujo en un régimen extraordinario.

Todos estos datos son datos registrables según una nomenclatura determinada, que permite realizar el post-proceso de cálculo.

4.2. Evaluación del índice de riesgo

Como en el caso de la Inspección Principal del puente, el fin de la inspección del conjunto puente-cauce es obtener un índice que represente y que, en la medida de lo posible, cuantifique el riesgo potencial del puente frente a fenómenos de socavación. Este índice permite realizar una priorización de las actuaciones a acometer, en este caso, orientadas a tareas de protección para reducir la capacidad erosiva del cauce. Esta evaluación, comienza por la agrupación de los datos recogidos en la inspección, reuniéndolos en los siguientes epígrafes:

■ Datos observados desde la plataforma del puente:

- Régimen del flujo.
- Puente en llanura de inundación
- Ángulos de aproximación y de desvío.
- Cobertura de la superficie (bosque, matorral, cultivos...).

■ Datos observados desde debajo del puente:

- Material del lecho (hormigón, roca, bolos/guajarros, gravas, arenas...).
- Existencia de barras puntuales o intermedias (vegetadas o no).
- Existencia de obstrucciones (invasiones de cauce, afección de otras estructuras, vertidos, edificaciones...).
- Acumulaciones de material de arrastre (matorrales, árboles, basuras, escombros...).
- Evidencia de sobrepaso de la estructura.
- Evidencia de flujo en carga.

■ Datos observados en pilas y estribos:

Figura 7. Agrupación de los datos recogidos en una Inspección.

- Localización (margen izqda., dcha., cauce, llanura de inundación...).
- Ángulo de ataque.

- Forma del frente (en punta, redondeada, cuadrada, en H...).

- Orientación de las aletas.

- Material constitutivo (hormigón, acero, piedra, ladrillo...).

- Nivel máximo alcanzado por el agua.

- Acarreos.

- Fosas de socavación.

- Material del lecho en subestructura (escolleras, aluviones, roca, hormigón...).

- Medidas de protección existentes (gaviones, diques, revestimientos, azudes...).

■ Datos observados en el cauce aguas arriba y aguas abajo:

- Anchura del cauce.

- Tipo de cauce (rectilíneo, trenzado, anastomosado, torrencial...).

- Cobertura vegetal de las márgenes.

- Material de las márgenes y del lecho (hormigón, roca, bolos/guajarros, grava, arena...).

- Erosión de las márgenes (suave, severa, deslizamiento...).

- Existencia de afluentes o confluencias (naturales o artificiales).

- Impacto meándrico.

- Existencia de barras puntuales o intermedias (vegetadas o no).

- Existencia de obstrucciones.

- Protecciones de cauce y de már-

genes (escolleras, gaviones, diques, espigones, revestimientos...) y condiciones de conservación.

- Erosión por contracción aguas arriba y por expansión aguas abajo.

Todos estos datos son introducidos en una base de datos donde se tratan, mediante un algoritmo específico, con vistas a cuantificar los cuatro parámetros que caracterizan la vulnerabilidad del puente, a saber:

■ El descriptor de vulnerabilidad del puente que es función de:

- La implantación de los estribos.
- La implantación de las pilas.
- La forma del frente de los fustes de las pilas.

- El tipo de cimentación.

- El material de la cimentación.

- El ángulo de ataque de la subestructura.

■ El descriptor del cauce que depende de:

- La existencia de barras o de obstrucciones.

- La existencia de acumulaciones de depósitos.

- El tipo de cauce.

- La evidencia de impacto meándrico.

- Las erosiones de las márgenes.

- El material del lecho y de las márgenes.

- La influencia de los afluentes.

- La tipología de las protecciones del cauce y su estado.

- La afección de mareas oceánicas.

■ El *descriptor de la interacción cauce-estructura* que se determina basándose en:

- El material del lecho del cauce en la subestructura.
- La evidencia de flujo en presión.
- El ángulo de desvío en régimen de aguas altas.
- La existencia de protección de la subestructura en la zona del puente.
- El estado de dicha protección.
- La relación entre el ancho de acarreos y el ancho de los fustes.
- La evidencia de erosión por expansión.

■ El *descriptor de la socavación del puente* que cuantifica la existencia de socavaciones, descalces o giros que ya se hayan producido en la estructura inspeccionada:

Integrando estos descriptores, y considerando también la importancia del puente, se obtiene el **ÍNDICE DE RIESGO**, que caracteriza el conjunto puente-cauce en función de su vulnerabilidad frente a la posible socavación que pudiera producir una eventual avenida. Así, se pueden agrupar los puentes en cinco categorías, en función del valor del Índice de riesgo obtenido:

■ *Estructuras con Índice de riesgo menor o igual a 20*

Se trata de puentes sobre cauces cuyo índice de vulnerabilidad es prácticamente nulo. Se deben volver a inspeccionar en un tiempo prudencial, marcado por los plazos que se definan como intervalo tipo hasta la próxima Inspección Principal.

No es probable que se vean afectados en avenidas extraordinarias; aunque, dada la dinámica de los ríos, puede resultar aventurado corroborar este hecho.

■ *Estructuras con Índice de riesgo mayor que 20 y menor que 50*

A este grupo pertenecen las obras cuyo índice de vulnerabilidad es aceptable, a corto plazo, en las que se ha detectado:

- Algún indicio de socavación moderada, y/o
- Algún parámetro negativo de cierta importancia, como puede ser el ángulo de ataque de la subestructura,

existencia de erosión por expansión (contracción del cauce), impacto meándrico, o erosión en las márgenes.

En estos casos se debe proceder, en general, al seguimiento de los parámetros de socavación que han generado el Índice de riesgo del puente.

■ *Estructuras con Índice de riesgo mayor que 50 y menor que 70*

En general, a este grupo pertenecen las obras cuyo índice de vulnerabilidad es de moderado, a corto plazo, en las que se han detectado la conjunción de diversos parámetros negativos o algún elemento de la subestructura con socavación apreciable.

En estos casos se debe proceder, en general, al seguimiento periódico de los parámetros de socavación que han generado el Índice de riesgo del puente o en su caso a realizar las protecciones pertinentes.

El valor 70 puede considerarse como umbral de aceptación.

■ *Estructuras con Índice de riesgo mayor que 70 y menor que 100*

A este grupo pertenecen las obras cuyo índice de vulnerabilidad es severo o muy severo, a corto plazo, en las que se han detectado la conjunción de diversos parámetros negativos y, además, algún elemento de la subestructura con socavación avanzada o fuerte.

En estos casos se debe proceder, en general, a proteger convenientemente la subestructura y, si procede, el cauce.

■ *Estructuras con Índice de riesgo mayor o igual a 100*

Son siempre puentes en que se ha detectado asentamiento o giro en algún elemento de la subestructura. Su condición de vulnerabilidad es elevada y el potencial de riesgo es inaceptable.

En los puentes en que se da esta casuística es obligado realizar un estudio de detalle de la subestructura, con vistas a proceder a un recalce o, en algunos casos, hay que proceder a acometer algunas reparaciones de forma inmediata, o incluso con carácter de urgencia.

4.3. Algunos resultados de la aplicación

La metodología de inspección reñada y los criterios de evaluación del Índice de riesgo frente a la socavación que se acaban de presentar, constituyen un tratamiento novedoso del problema de la vulnerabilidad de los puentes sobre cursos de agua. Durante los años 2000 a 2003 la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España ha realizado la campaña de inspección visual de los llamados 2º y 3º itinerarios que incluye unos 4800 puentes de la RIGE (Red de Interés General del Estado). De ellos, cerca del 38% son pasos sobre cursos de agua a los que se ha realizado una inspección del conjunto cauce-estructura y en los que se ha evaluado el Índice de riesgo, conforme a los criterios comentados anteriormente.

Se presentan a continuación algunos resultados representativos de los 1818 puentes sobre cauce que han sido evaluados:

- 152 puentes tienen los estribos dentro del cauce, y en 248 las pilas forman un ángulo mayor que 30º con la dirección del flujo del agua
- 261 puentes se situaban en cauces torrenciales, y 380 en las proximidades de meandros. De los primeros, 34 presentaban algún tipo de socavación, mientras que en 53 del segundo grupo se detectó algún tipo de impacto meándrico.

- Del total de puentes inspeccionados, 23 sufrían socavación avanzada en pilas o estribos y 75 socavación moderada

En lo que se refiere al Índice de riesgo, han resultado 20 puentes con un índice mayor que 100 y 22 con un índice situado entre 70 y 100.

4.4. Conclusiones

Una gran parte de los colapsos habidos en puentes en estos últimos tiempos han sido debidos a fallos en cimentaciones de puentes ubicados en cursos de agua producidos por erosiones locales o socavaciones. Por otra parte, es difícil conocer el estado de dichas cimentaciones ya



Nuevo enlace en Polígono Barreiros (Ourense), N-525.

que suelen ser inaccesibles o, cuando menos, difícilmente visibles. Además, no es fácil conocer el riesgo de colapso, porque puede ser que, en el momento de la inspección, no se hayan manifestado todavía deterioros de los que pueda deducirse que

existe un cierto riesgo para la estructura.

Resulta, por tanto, imprescindible que las inspecciones de puentes sobre cauces se completan con un estudio de éstos tendentes a conocer el riesgo potencial de socavación exis-

tente. La cuantificación de este riesgo se debe hacer basándose en las observaciones del estado del propio puente y en las condiciones y características geométricas, físicas y evolutivas del propio cauce en la zona en que se ubica la obra de fábrica.

En este documento se presenta, de forma breve y sucinta, las líneas maestras de una metodología para realizar las inspecciones del puente, de su subestructura y del entorno del cauce que cruza. También se presentan unos criterios para evaluar, de forma algo objetiva, la vulnerabilidad del puente frente a la acción socavadora del curso de agua. Por último, se incluye un resumen de los resultados obtenidos en las 1818 inspecciones llevadas a cabo sobre puentes que cruzan cursos de agua, en el ámbito del Sistema de Gestión de Puentes implantado en la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España. ■