



**EVALUACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL  
DE SOCAVACIÓN  
EN PUENTES SOBRE CURSOS DE AGUA**

José M. SIMÓN-TALERO

Pedro P. SÁNCHEZ

TORROJA INGENIERÍA S. L.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

La función primordial de un puente es la de dar continuidad a la carretera, salvando, para ello, los obstáculos naturales o artificiales que se encuentren en su trazado. Esta obviedad cobra especial relevancia si el obstáculo a 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 reestablecimiento 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 acarrees,...) 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 certero, 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.

## **2.- METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN DEL PUENTE Y DE 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 en base a dos parámetros: vulnerabilidad del puente y geomorfología del cauce. Estos dos descriptores engloban gran cantidad de registros que, bajo un algoritmo de cálculo, permite establecer la condición de riesgo, en forma numérica.

### **2.1.- 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 reducción 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.

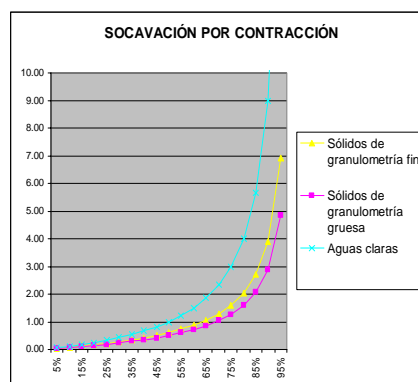


Figura 1. Contracción de un cauce de rambla

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.

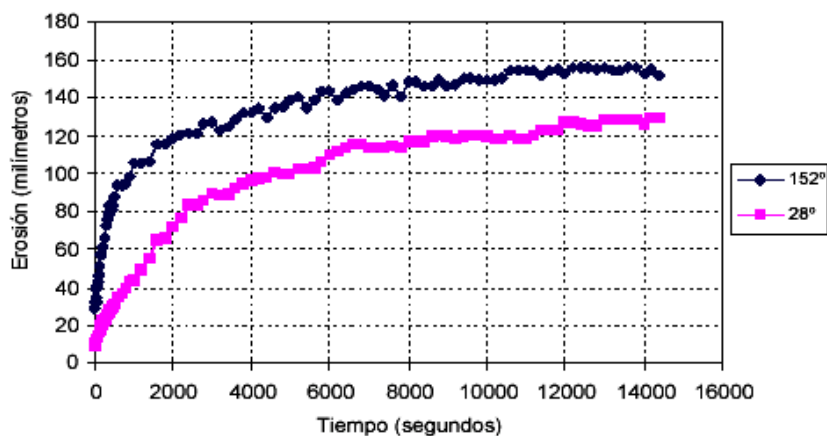


Figura 2. Profundidad de socavación en estribos en función del ángulo de ataque

En la figura 2 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 3 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.

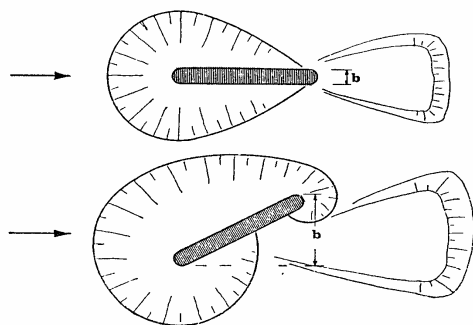


Figura 3. Influencia del ángulo de ataque en la socavación de pilas

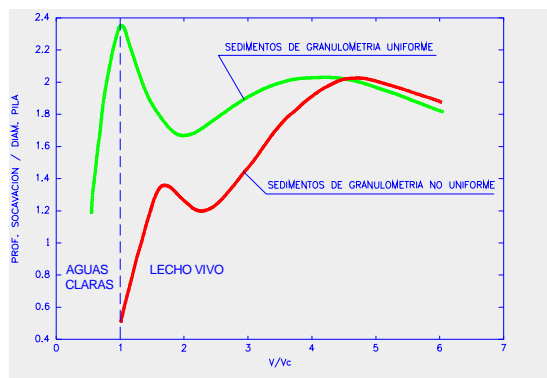


Figura 4. Influencia de la velocidad del flujo y de la granulometría del sedimento en la profundidad de socavación

c) Tipo de cimentación

El tipo de cimentación, profunda o directa, así como el material del substrato competente, son, igualmente, parámetros a tener en cuenta. Un puente con cimentaciones pilotadas puede haber sufrido un descalce por socavación y no resultar

potencialmente peligroso, si en el proyecto se tuvieron en cuenta estas condiciones (figura 5).

d) Examen de las fosas de socavación

Este efecto puede resultar demoledor, sin embargo, en cimentaciones directas o con pilotes de escasa longitud, o con un sustrato 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 fosa puede acumular sedimentos y enmascarar parcialmente la profundidad real de la socavación.



Figura 5. Socavación con cimentación profunda

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 (Figura 4), 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.

## 2.2.- 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 (figura 6), obstrucciones o acumulaciones de acarreo (figura 7) que dan indicios del comportamiento del río en régimen de avenida.



Figura 7. Barra intermedia vegetada



- El tipo de cauce (figura 8), rectilíneo, trenzado, anastomosado, meándrico, torrencial..., el material del lecho y de las márgenes (figura 9), que indican el grado de estabilidad del cauce.



Figura 8. Acarreos en pilas

- Las protecciones (figura 10) 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 sobre elevación de la lámina de flujo en un régimen extraordinario.

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



Figura 9. Cauce meándrico



Figura 10. Erosión de la margen

### **3.- 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/guijarros, 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:

- 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/guijarros, 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 márgenes (escolleras, gaviones, diques, espigones, revestimientos...) y condiciones de conservación
- Erosión por contracción aguas arriba y por expansión aguas abajo

Desde la carretilla | Debajo del puente | Pilas | Estribos | Material del lecho | Protecciones | Cauce | Observaciones

Agua arriba | Agua abajo

Anchura:  Tipo de cauce:

Material del lecho:

Material MI:

Material MD:

Cobertura vegetal: MI:  MD:

Erosión: MI:  MD:

Afluentes: Margen:   Dist. puente:

Impacto meándrico: Margen:   Dist. puente:

Barras	Tipo	Lecho visible	Anchura I	Anchura II	Distancia I	Distancia II	Distancia III	Vegetación I	Vegetación II	Altura I	Altura II
1	Puntuales	Si	3	1	2	3	4	1	2	3	2
2	Intermedias	Si	1	2,3	3	4,1	5	1	2	2	1

Obstrucción	Lecho visible	Tipo	Anchura I	Anchura II	Distancia I	Distancia II	Distancia III	Vegetación I	Vegetación II	Altura I	Altura visible
1	Si	Natural	1	1	2	3	2	1	2	1	1
2											

Protección	Lecho visible	Tipo	Localización	Condiciones	Longitud	Anchura máx. I	Anchura máx. II
1	Si	Escollera	Cauce	Necesita reparación	1	2	3
2							

Guardar Salvar

Figura 11. Agrupación de los datos recogidos en una Inspección

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 en base a:
  - 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, descálces 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 de 20 y menor de 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 de 50 y menor de 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 de 70 y menor de 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.- ALGUNOS RESULTADOS DE LA APLICACIÓN**

La metodología de inspección reseñada 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 de 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 de 100 y 22 con un Índice situado entre 70 y 100.

## **5.- RESUMEN Y 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 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 existente. 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.