

## **Estudio de la socavación y comportamiento de las cimentaciones de puentes sobre ríos y barrancos en la autopista Tarragona-Valencia-Alicante.**

**G. Burbano**

Dragados y Construcciones, S.A.

**F. Román**

Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos, S.A. (Intecsa)

**RESUMEN:** Se describe el método utilizado en el estudio de la socavación para el diseño de las cimentaciones de puentes sobre ríos y barrancos, de la Autopista Tarragona-Valencia-Alicante. A lo largo de un periodo de tiempo de hasta 15 años se ha observado su comportamiento en situaciones cercanas a la avenida de cálculo, comprobándose su buen funcionamiento general.

### **1. INTRODUCCION**

El fenómeno de la socavación es de importancia capital en el proyecto de cimentaciones sobre cursos de agua con poder erosivo. Incluso podría decirse que en España la socavación ha sido, con diferencia, la causa más frecuente de la ruina de puentes. Uno de los motivos por los que la socavación ha sido causa de estas ruinas es la dificultad de prever la magnitud de sus efectos con las técnicas hoy disponibles ya que no existen fórmulas o métodos contrastados para estimarlos. Ello hace que en la mayoría de los casos no se tuviera en cuenta explícitamente en los proyectos y que únicamente se dispusiera la cimentación "algo más profunda", lo cual no es en todos los casos seguro.

Este planteamiento ya se realizaba en el año 1971, de inicio del proyecto de los primeros tramos de la Autopista del Mediterráneo Tarragona-Valencia. A lo largo del trazado de la autopista de peaje A - 7, desde Tarragona a Alicante, se producen sucesivos cruces sobre ríos, barrancos o arroyos de escaso caudal permanente, pero de posibles altos caudales puntuales en tiempos concentrados. La importante pendiente longitudinal del lecho en muchas ocasiones, unido a la magnitud de los caudales posibles dan lugar a situaciones de cruces con alto poder erosivo. El material del lecho de los cauces es por lo general muy susceptible de ser erosionado ya que su tensión de arrastre

crítica es considerablemente inferior a la de cálculo. Muchos puentes actualmente existentes en dichos cursos de agua presentan erosiones importantes en torno a las pilas y estribos, y una parte apreciable de estos ríos cuentan en su haber con algún puente arruinado a causa de la socavación de su cimentación.

Para el proyecto de las cimentaciones de los puentes de la Autopista, se realizó un estudio general de la socavación y uno pormenorizado para cada uno de los puentes que lo requerían, manejando criterios para estimar la erosión que pudieron ser conservadores en algún caso, y que en general han dado lugar a cimentaciones cuyo comportamiento ha sido satisfactorio en la totalidad de los casos, incluso para la avenida de cálculo, situación que ha llegado a producirse.

En este artículo se exponen los métodos y criterios que entonces se utilizaron, las conclusiones a que se llegó y las disposiciones constructivas que se diseñaron.

### **2. METODOLOGIA DEL PROYECTO**

La metodología utilizada para el proyecto se basaba en:

1. Estudio hidrológico
2. Estudio geológico y geotécnico
3. Estimación de la socavación

que a continuación se detalla.

## 2.1 Estudio hidrológico

Se reduce al cálculo de los caudales, calados y velocidades máximas esperables para un cierto periodo de retorno que se fijó en 100 años salvo para los casos en los que la avenida pudiera producir daños muy importantes, trabajando con mayores periodos de retorno.

## 2.2 Estudio geológico-geotécnico

Para este estudio eran fundamentales los reconocimientos geotécnicos realizados para el proyecto de la cimentación con los que se puede tener un buen conocimiento de espesores y naturaleza del lecho del río.

Asimismo se tomaron muestras de los materiales del lecho aguas arriba y abajo del puente para conocer su granulometría, y se inspeccionaban los puentes y otras obras próximas y en situaciones hidrológicas similares para conocer los efectos de las últimas riadas.

Además el reconocimiento del terreno se ampliaba hasta conocer otros detalles importantes como la presencia de azudes y zonas de extracción de áridos aguas arriba y abajo del cruce de la Autopista.

## 2.3 Estimación de la socavación

El proceso que se seguía conllevaba la estimación o cálculo de los siguientes factores:

- Grado de erosionabilidad
- Socavación general por causas naturales
- Socavación artificial por causas externas
- Erosión local en torno a las pilas
- Efecto de los estribos

Los criterios tenidos en cuenta en cada caso se describen a continuación:

### 2.3.1 Grado de erosionabilidad

Se determinaba comparando los datos de tensión de arrastre y velocidad obtenidos con la avenida de cálculo, con los valores críticos obtenidos en el estudio geotécnico. Estos dependen fundamentalmente de la naturaleza y tamaño de las partículas del material del lecho.

Para determinar los valores de las tensiones y velocidades de arrastre y los críticos, se siguieron los criterios de LANE, E.W. (1952), CARSTENS, JHD (1966) y SHIELDS.

Se definía un grado de erosionabilidad como el mayor de los valores

$$G = \frac{V_a}{V_c} \quad \text{ó} \quad G = \left( \frac{T_A}{T_c} \right)^{1/2}$$

donde  $V_a$  y  $V_c$  son velocidades de arrastre y crítica y  $T_A$  y  $T_c$  son las tensiones de arrastre y críticas.

### 2.3.2 Socavación general ( $S_g$ )

En la mayoría de los casos se siguieron reglas empíricas presentes en distintas publicaciones probablemente basadas en la observación de modelos reducidos. El criterio seguido fue el siguiente:

- Cuando la tensión de arrastre y la velocidad son claramente inferiores a la crítica el descenso general del cauce no se tenía en cuenta, es decir:

$$S_g = 0 \quad \text{para} \quad G < 1$$

- Cuando las tensiones y velocidades eran comparables ( $1 < G < 3$ ) se tomó una socavación era del orden de la mitad del incremento de calado durante la avenida, el cual en la mayor parte de los casos era prácticamente el calado de cálculo.
- Cuando las tensiones y velocidades eran claramente superiores a las críticas ( $G > 3$ ) el descenso se tomó igual al incremento de calado, llamándose la atención en los casos de que  $G > 5$  donde las protecciones debían ser especiales.

En los últimos puentes proyectados (año 1981) se utilizaron además los criterios de LISCHTVAN-LEBEDIEV si bien en muchas ocasiones han dado valores excesivamente conservadores.

### 2.3.3 Socavación artificial

Tenida en cuenta fundamentalmente por la presencia de extracciones de áridos en las proximidades del cruce, el criterio manejado fue similar al anterior de tal forma que la profundidad de socavación era igual a la de la extracción de áridos, o a su mitad, en función de que el grado de erosionabilidad fuera  $G > 3$  ó  $G = 1$  a  $3$ .

### 2.3.4 Socavación alrededor de las pilas

En los primeros puentes se siguieron los criterios de LAURSEN, EM (1970) que permiten calcular la profundidad de socavación en función del ancho de la pila, de su forma y del calado; así como los criterios de LARRAS, J (1963) para quien la profundidad de socavación es función del tamaño de la pila y de la posición relativa de ésta con el sentido de la corriente.

### 2.3.5 Efecto de los estribos

La mayor parte de los estribos van cimentados sobre un terraplén de características específicas, ya que los puentes son isostáticos, con juntas en el último vano lo cual permite una transición suave entre el terraplén y la estructura. En estas condiciones, la seguridad del estribo debía ser total por lo que los terraplenes de cimentación nunca han invadido el cauce de avenidas.

Únicamente en la conocida geológicamente como "llanura de inundación" del Río Júcar podrían producirse situaciones de terraplenes de estribo inundados aunque difícilmente puede hablarse en este caso de un cauce normal o de avenidas constreñido por los estribos. Por lo tanto los criterios de LAURSEN (1970) y de otros investigadores, KOMURA (1966) no podían claramente aplicarse.

No obstante se tuvo en cuenta el hecho de que podría producirse una erosión importante localizada al pie de los terraplenes de los estribos de estos puentes, lo que motivó las protecciones consiguientes.

### 3. PROTECCIONES CONTRA LA SOCAVACION

Las protecciones que se plantearon pueden enumerarse en los siguientes tipos:

#### a) Reducir las causas de socavación

- Limitación de la velocidad de avenida, ampliando la sección suficientemente.
- Eliminación de los obstáculos naturales que puedan perturbar la corriente aguas arriba.
- Minimizar la obstrucción causada por la estructura. Terraplenes claramente fuera del cauce de avenidas, pilas con alineación, forma y situaciones adecuadas.
- Restringir las operaciones de extracción de áridos u otras perturbaciones artificiales del cauce.

#### b) Profundizar la cimentación de las pilas

- Uso de cimentaciones profundas bajo la máxima profundidad de socavación previsible. Zapatas profundas, cajones, pilotes, etc.

#### c) Disposición de elementos contra la erosión

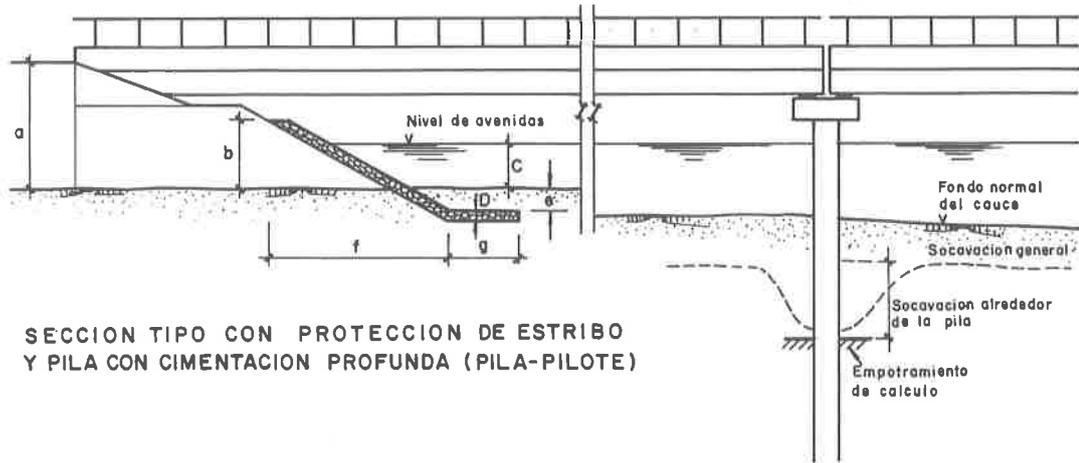
- Canalización del río.
- Lechos de escollera bajo el puente.
- Protección del lecho con colchones hinchables, porosos, rellenos de hormigón (existen diversas patentes).
- Pantallas de tablestacas en el pie de los terraplenes, frente a los estribos y rodeando las pilas.
- Conos de escollera rodeando las pilas.
- Construcción de los terraplenes con escollera.
- Diques de espigones en la embocadura de los estribos.

De todas estas medidas, dos de ellas pueden considerarse como claramente eficaces y no dependen de otros factores de difícil concreción o de actuaciones claramente fuera del ámbito de la Autopista. Estas medidas son:

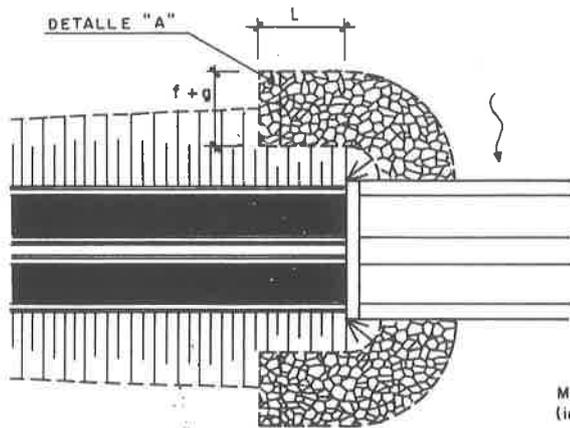
- Situar los terraplenes fuera del cauce de avenidas.
- Profundizar la cimentación de las pilas bajo el nivel de socavación estimado, empotrándola si es posible en estratos menos erosionables.

Estas dos medidas han sido contempladas en casi la totalidad de los cruces de cursos de agua. En casos muy concretos, tales como el tramo correspondiente a la zona del Río Júcar, o en el valle de Tabernes, se ha permitido que el terraplén estuviera en zona inundable. En dichos casos se ha protegido la zona inundable (más un resguardo) con una escollera cuyo tamaño fue diseñado apoyándose en las formulaciones de ISBACH y LANE, que fijan el tamaño de la partícula no arrastrada por la corriente en el curso de una caída en un fluido, y la tensión de arrastre de un específico material.

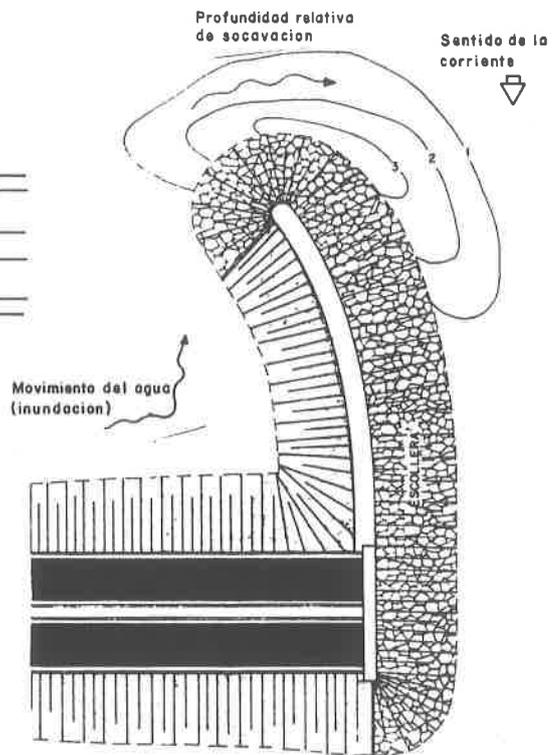
En los casos en que la disponibilidad de escollera era dificultosa y/o en los que la velocidad del agua era inferior a 5 m/s las protecciones se diseñaron con gaviones rectangulares o corazas de gaviones.



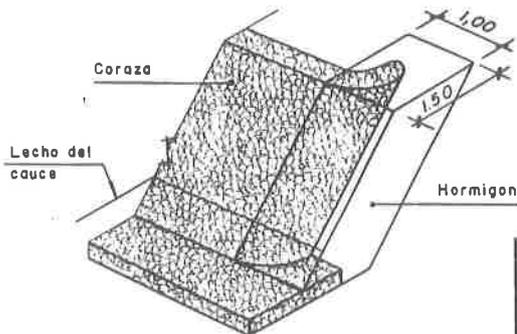
SECCION TIPO CON PROTECCION DE ESTRIBO Y PILA CON CIMENTACION PROFUNDA (PILA-PILOTE)



PLANTA DE PROTECCION DEL TERRAPLEN CON ESCOLLERA Y CORAZAS



PLANTA DE PROTECCION DEL TERRAPLEN CON DIQUE DE EMBOCADURA Y ESCOLLERA O CORAZAS



DETALLE "A" DE EMPOTRAMIENTO DE CORAZAS

RANGO FRECUENTE DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROTECCIONES

	CORAZAS	ESCOLLERA
TAMAÑO PIEDRA	—	0,10 - 0,60 m.
PROFUNDIDAD (e)	1,2 m.	0 - 0,50 m.
ESPESOR CAPA (D)	0,15 - 0,40 m.	0,25 - 1,30 m.
RESGUARDO (g)	1 - 3 m.	1,50 - 8,50 m.
CALADO (c)	1 - 2,50 m.	1 - 4,00 m.
ALTURA PROTECCION (b)	1,50 - 3,00 m.	1,50 - 4,50 m.
ALTURA TERRAPLEN (a)	1,50 - 9,00 m.	1,50 - 9,00 m.
LONGITUD VUELTA (L)	3 - 18 m.	5 - 18 m.

### 3.1 Protecciones de las pilas

Las cimentaciones profundas de los puentes de ríos y barrancos de la Autopista es a base de pilotes cilíndricos Raymond de 36" y 54" hincados o colocados con perforación previa.

Se consideró una profundidad de socavación igual a la suma de la socavación general más la socavación local en torno a las pilas del puente, más la socavación por causas artificiales. Dado que la suma de las profundidades citadas podía llevar a valores de la socavación muy importantes y, presumiblemente, irreales en la mayoría de los casos (en ocasiones del orden de 9 m ó más) y que era muy escasa la probabilidad de que durante la avenida extraordinaria el puente estuviese sometido a las máximas cargas, se adoptó el siguiente criterio:

- Para avenidas "normales" (período de retorno 5 años) el coeficiente de seguridad de la cimentación con el puente sometido a las máximas cargas, debía ser mayor o igual que 3.
- Para la avenida "extraordinaria" (período de retorno igual a 100 años), con el puente sometido a las máximas cargas, el coeficiente de seguridad debía ser igual o superior a 1.

Con la profundidad de socavación fijada se calculó la longitud de pilote a partir del fondo de socavación, necesaria para obtener la correspondiente carga de hundimiento.

Para el cálculo de la superestructura se contó la profundidad de empotramiento a partir del fondo de la socavación.

### 3.2 Protecciones de estribos

Los estribos que por causas ajenas se veían en el cauce de avenidas se protegieron con distintas disposiciones de un caso a otro.

Entre todas podemos citar:

- Manto de escollera tapizando los taludes frontales y laterales de los terraplenes de acompañamiento.
- Gaviones rectangulares.
- Corazas de gaviones, empotradas en el extremo del paramento de aguas arriba.
- Encauzamientos locales con diques de escollera, corazas o gaviones.

## 4. COMPORTAMIENTO

A lo largo de los 15 años desde la puesta en servicio de los primeros tramos, se han producido situaciones lluviosas que han originado crecidas importantes próximas a las de cálculo. De hecho en Noviembre del 82 el desmoronamiento de la presa de Tous produjo una avenida que en algunos puentes fue muy importante.

El comportamiento general ha sido perfecto. De los problemas observados tras las riadas ocurridas creemos necesario destacar las siguientes observaciones y conclusiones:

- Las protecciones de escollera, gaviones y corazas de los terraplenes de estribos han resultado de una eficacia total salvo en los casos en que el agua puede entrar por detrás o por arriba de la escollera, en cuyo caso puede llegar a desorganizarla. Es aconsejable empotrarla siempre en su extremo de aguas arriba con la ayuda de un "muerto" de hormigón.
- Los diques de encauzamiento protegidos con escolleras o gaviones desplazan hacia aguas arriba la profundidad máxima de socavación y resultan eficaces en los casos de una gran constricción del cauce.
- En los cauces de gran poder erosivo las pilas que caen dentro del cauce deben protegerse en su pie contra el impacto de bolos o bloques arrastrados por la corriente.

## 5. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a Autopistas del Mare Nostrum, S.A. su autorización para la publicación de este artículo.