

La audacia del Pabellón Puente en el río Ebro (Expo 2008): consecuencia en erosión fluvial y exigencias de protección y auscultación

The daring Bridge Pavillion (Pabellón Puente) over the Riber Ebro (Expo 2008): affect on river erosion and protection and auscultation requirements

Juan Pedro Marín-Vide. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ingeniería Hidráulica. (UPC) Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, E.T.S.I.C.C.P. Barcelona. vide@grahi.upc.edu

Cristina M. S. Fael. Dra. Ingeniera Civil
Profesora de Hidráulica. (UBI) Universidade da Beira Interior, Covilhã (Portugal). cfael@ubi.pt

Francisco Núñez González. Ingeniero Civil
Investigador. (UPC) Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, E.T.S.I.C.C.P. Barcelona. fngon@yahoo.com

Carles Ferrer i Boix. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Investigador. (UPC) Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, E.T.S.I.C.C.P. Barcelona. carles.ferrer@upc.edu

Fernando Gutiérrez Carrera. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
EPTISA Servicios de Ingeniería. fgutierrez@eptisa.es

Francisco-Javier Goyeneche Vázquez de Seyas. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
EPTISA Servicios de Ingeniería. fgoyeneche@eptisa.com

Resumen: El artículo trata del riesgo de erosión fluvial en una pila compleja de gran anchura, construida en el cauce del río Ebro en Zaragoza. Se describe el problema de erosión local en la pila, las características del modelo físico ensayado y los mantos de escollera que consiguen detener la erosión, así como la ejecución y auscultación de esta protección.

Palabras Clave: Erosión local en puentes; Modelo físico; Escollera

Abstract: The paper deals with the risk of scouring at a very wide complex pier built within the channel of Ebro river at Zaragoza (Spain). The main points described in the paper are: the local scour problem, the characteristics of the physical model used and the riprap apron able to stop scouring, as well as the execution and monitoring of this protection.

Keywords: Bridge pier scour; Physical Model; Riprap

A. Introducción

El Pabellón Puente de la Exposición Internacional Zaragoza 2008, uno de los más visitados por el público de la muestra, se ha constituido en uno de sus iconos así como el símbolo de la Zaragoza del s. XXI. Diseñado por la arquitecta iraquí Zaha Hadid, premio Pritzker de Arquitectura, ha supuesto un reto técnico sin precedentes para la práctica totalidad de las especialidades implicadas en su ejecución (fig.1). Desde su cimentación, con pilotes de 2 m de diámetro y profundidades de más de 70 m, hasta sus acabados interior-

res, pasando por la estructura, un complejísimo puzzle de más de 62.000 piezas o su fachada, formada por más de 27.000 paneles, han supuesto una continua superación de dificultades técnicas, logísticas, organizativas, etc., agravadas por los exiguos plazos disponibles.

Dentro de dichas especialidades la hidráulica fluvial ha ocupado un papel que se ha revelado también como crítico en el proceso de ejecución de las obras. El Pabellón Puente se apoya en una pila central cimentada sobre una pequeña isla natural cercana a la margen izquierda del río. Por su forma y tama-



Fig.1 Pabellón Puente. Aguas arriba: el Puente del Tercer Milenio. A la derecha: Expo.

ño se trata de un elemento de gran exposición al flujo del río, lo que suscita una de las problemáticas más importantes en hidráulica de puentes: la socavación de la cimentación por el agua. Consciente de dicha importancia, la Sociedad Expoagua encargó a la empresa Eptisa Servicios de Ingeniería, S.A. que venía desarrollando los trabajos de Gestión de Construcción así como el Control y Seguimiento del Pabellón Puente, el estudio en detalle de la erosión para desarrollar una solución constructiva.

La complejidad de la pila se puede entender mejor a partir de las características geométricas de su cimentación (encepado y pilotes), de la pieza que la recubre uniéndose al tablero del puente (llamada el cáliz) y del propio tablero que apoya sobre el encepado (fig.2). La cimentación está formada por 10 pilotes de diámetro 2.0 m reunidos en un cabezal o encepado con forma en planta poligonal, de longitud máxima 24,43 m, 9,90 m de anchura y con un canto de 3.40 m. Su alineación es oblicua con respecto a la dirección de las aguas. La profundidad de cimentación alcanzada con los pilotes es extraordinaria: incluso superior a 60 m, siendo todo ese espesor material aluvial.

El proyecto arquitectónico ha implicado la construcción del cáliz, que envuelve el cabezal o encepado abrazando los pilotes y soldándose al tablero por debajo. Según los estudios hidráulicos previos, el cáliz, así como una parte inferior del tablero, resultan mojados por la avenida de proyecto ($T=500$ años) del río Ebro. En tal caso la obstrucción del flujo tiene

unos 28 m de longitud al nivel del fondo del cauce y unos 80 m de longitud a nivel de la superficie libre. La preocupación surge ante las grandes dimensiones de este obstáculo enfrentado al flujo.

En las primeras fases se consideró para la cimentación de la pila un espesor de terreno no colaborante en el cálculo de los pilotes de sólo 6 m, contado desde la parte superior de la isla. Esta cifra es mucho menor que la erosión total que puede desarrollarse. En el proyecto constructivo previo sobre las características especiales de la obra se analizó y evaluó la erosión fluvial potencial dividiéndola en las siguientes componentes:

- La erosión general del río que ocurre independientemente del puente, porque la cota del lecho desciende transitoriamente durante las avenidas. Las llamadas fórmulas de régimen (Blench, Lacey, Lischtvan-Lebediev) estiman el calado en equilibrio dinámico, al que se resta el calado del estudio hidráulico (fondo fijo). En este caso se obtuvo 0.54 m de erosión general para la avenida de proyecto.
- La erosión en la sección del puente y sus inmediaciones, debida al estrechamiento causado por el puente respecto a la anchura ocupada por la avenida antes del puente. Debido a la gran obstrucción de la sección natural por el tablero y la pila se estimó una erosión del orden de 2.0 m por este concepto.
- La erosión local originada en pilas y elementos rodeados por la corriente. Esta es la componente más relevante. Usando la fórmula de Laursen: $e = 1,5 \cdot B^{2/3} \cdot \gamma^{1/3}$ recomendada en España [1] y la de Richardson [2] $e = 2 \cdot k_1 \cdot B^{0,65} \cdot \gamma^{0,35} \cdot Fr^{0,43}$ recomendada en EE.UU., donde e es erosión, B es anchura de pila, γ es calado, Fr es número de Froude y k_1 coeficiente de forma, se obtiene, usando la anchura de pila en la base, $e = 25,7$ m y $e = 24,5$ m respectivamente. Un defecto de estas fórmulas es que sobreestiman la erosión si $B/\gamma > 5$ (pila ancha) como ocurre en este caso. Por este motivo, y por tratarse de una pila compleja (pila formada por fuste, encepado y pilotes), se procedió al cálculo con metodologías más específicas[3] [4], que dieron valores más realistas como previsión de la erosión local: 17,1 m y 22,4 m, todavía muy grandes.

En resumen, a priori se estimaba la erosión potencial en torno a los 25-27 m. Por otra parte, la veloci-

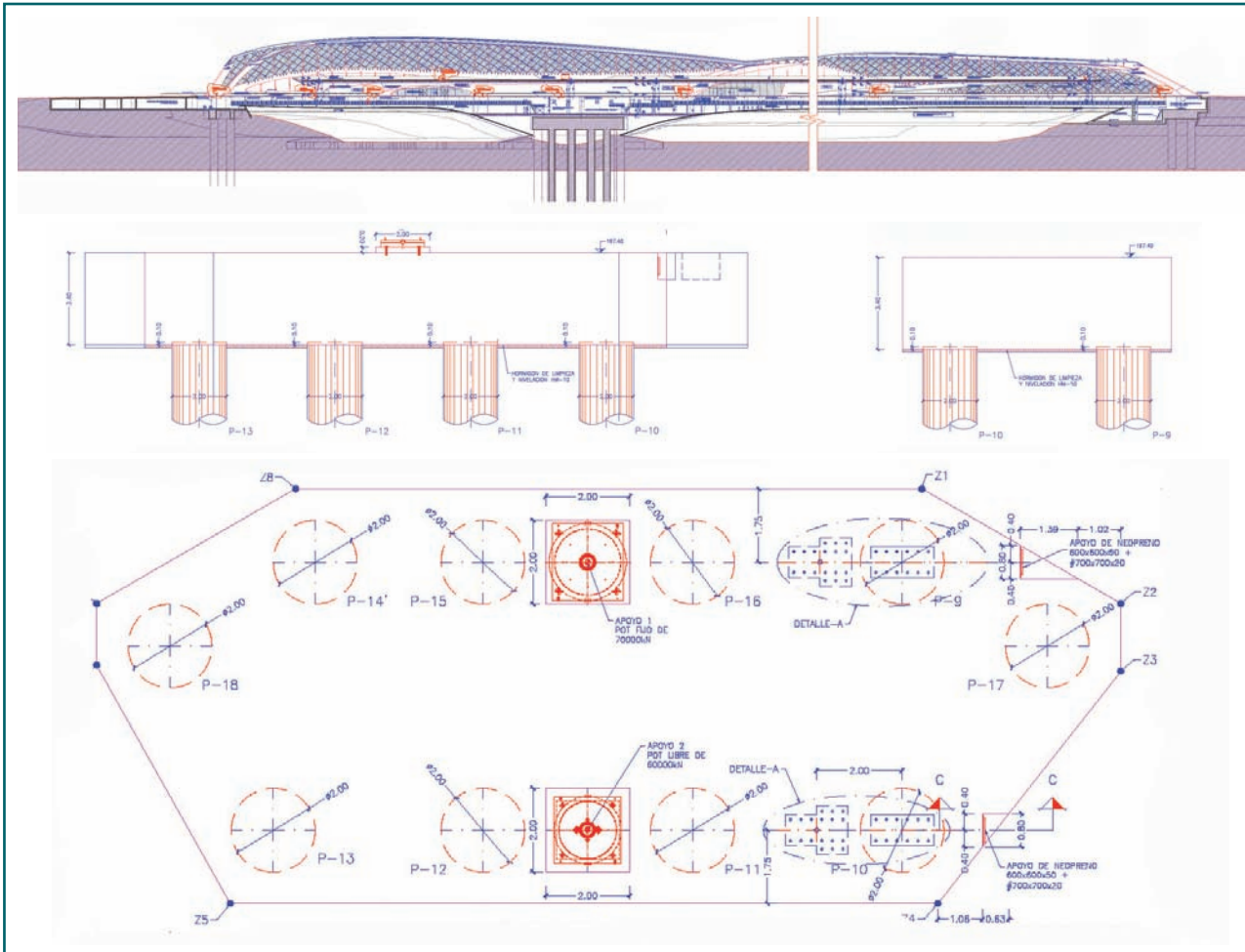


Fig.2. Arriba: corte longitudinal del puente con cáliz, encepado y pilotes. Centro: corte según dos ejes perpendiculares del encepado. Abajo: planta de la cimentación.

dad calculada en la sección del puente era 3,8 m/s. De ahí, una protección mediante manto de escollera[1] debería ser un anillo de 30 m de anchura rodeando la pila, de 3 m de espesor y peso de unas 5 toneladas (diámetro $\approx 1,50$ m). La magnitud de la erosión potencial, las dimensiones de la obra de protección (extensión y peso) y el interés de Expoagua2008 por conocer el funcionamiento hidráulico de la nueva estructura sobre el río Ebro motivó un convenio de Epitisa con la UPC para el estudio en modelo reducido de la erosión local y los medios de protección con mantos de escollera. El estudio se acordó en marzo de 2008 con fecha de finalización el 10 de mayo de 2008, atendiendo a la fecha de inauguración de la Exposición.

Un puente fluvial debería abordar el estudio de los aspectos hidráulicos, en particular la erosión, desde sus primeras fases, puesto que un 50% aproximadamente de los fallos de grandes puentes tiene su causa en la socavación[2]. Trazado, estructura, cimentación

de hidráulica fluvial se deberían estudiar conjuntamente. La ingeniería fluvial no debe ser la última disciplina en intervenir, so pena de no ofrecer más que soluciones insatisfactorias. Que el problema de erosión del Pabellón Puente se remedie ahora con un manto de escollera no debe hacernos olvidar que la seguridad del puente depende de la cimentación, ya que la escollera no es más que un medio *fungible* para combatir la erosión local (no la general ni la de estrechamiento), que no forma parte inseparable de la estructura, sino que es granular y móvil. Por ello, podría perderse o ser afectada por otras obras en el río algún día. Para mantener su función de evitar la socavación de la cimentación hay que vigilarla y eventualmente reponer el manto con nuevo material. Esto lleva a la necesidad de auscultación del puente.

El objetivo del modelo es desarrollar la idea tradicional (y correcta) de combatir la erosión local por medio de la escollera. La geometría tan particular del cáliz y tablero del puente junto al número y posición

de los pilotes y a la orientación del conjunto con respecto al río hace aconsejable el estudio del problema mediante un modelo físico (reducido). Los cálculos de erosión local en pilas complejas no pueden dar un resultado cuantitativo preciso. Los modelos matemáticos por su parte no han alcanzado todavía la capacidad de resolver un flujo tridimensional sobre fondo erosionable con ventaja frente a un modelo físico. Del modelo físico se espera el dimensionamiento del peso y de la extensión en planta de los mantos de escollera, así como un mejor conocimiento de la erosión y del flujo.

B. Descripción del modelo

Un modelo físico no puede ser una réplica exacta de la realidad, pero sí una técnica de análisis superior a un modelo matemático sobre todo en el caso de flujo tridimensional, con presencia de un lecho aluvial y cuando existe una interacción entre el agua, el fondo y una estructura de geometría compleja. La semejanza en modelos reducidos destinados al estudio de estos fenómenos[5] se puede resumir en cuatro puntos principales: *i)* que el modelo sea no distorsionado, pues de lo contrario se distorsionan los obstáculos, el flujo y los fosos de erosión; *ii)* que se emplee la semejanza de Froude apropiada para movimientos con superficie libre; *iii)* que el flujo en el modelo sea turbulento desarrollado como lo es en el prototipo, condición que se expresa por medio de un número de Reynolds mínimo de 2.500 a 5.000 y significa que las fuerzas viscosas en el modelo no aumentan de importancia tanto como para alterar el tipo de movimiento y *iv)* que el diámetro del material granular en el modelo evite efectos cohesivos y formas de fondo de tipo rizos o arrugas, para lo cual se exige que el número de Reynolds granular tenga un valor mínimo en modelo de 70 a 400. Cuando el material de un río es muy grueso o el modelo es grande en relación al prototipo estos problemas no ocurren, sino que se puede aplicar al material aluvial del prototipo la misma escala única del modelo.

En la semejanza de la erosión local se aprovecha también que el transporte sólido tiene poca influencia. No se representa en el modelo el transporte sólido del río Ebro, sino que se ensaya el modelo con la técnica de "agua clara", es decir con agua sin material sólido. Los ensayos se realizan con una arena fina que

para el caudal de ensayo se encuentra cerca de su umbral de inicio de movimiento. Esto significa que la arena del modelo no se mueve, o sólo inapreciablemente, cuando circula este caudal. Así pues, no se alimenta con arena el modelo pero tampoco el agua arrastra de manera general la arena, sino sólo la escarba localmente. Los ensayos se facilitan porque no es necesaria la alimentación de arena en cabecera. El modelo no es plenamente de lecho móvil o "morfo-dinámico" sino localmente erosionable (más sencillo) ya que sólo la zona de influencia de la erosión local es móvil y sólo son reales las formas directamente asociadas al foso de socavación. Una diferencia entre la erosión en agua clara y la real es que la primera se desarrolla más lentamente en el tiempo[4]. Por ello, los ensayos tienen que ser de larga duración. Pero si se hace así, se ha demostrado que esta condición de agua clara al borde del inicio del movimiento es la que produce la máxima erosión local, mayor que la de una avenida real que moviliza todo el lecho. La larga duración de los ensayos de agua clara es por tanto un artificio para garantizar que el ensayo quede del lado de la seguridad.

El modelo se ha implantado en una instalación existente preparada para el ensayo de fenómenos locales. Esto era poco menos que una necesidad para un trabajo en modelo reducido con un plazo tan corto. Es un canal recto de laboratorio de 4 m de anchura y 28 m de longitud, con fondo y paredes de 1 m de altura. Cuenta con un área más profunda que el resto (una zanja), para albergar los fosos de socavación y los mantos de escollera, de 3 m de longitud, 65 cm de profundidad y la anchura completa (4 m). En la sección final una compuerta abatible sirve para la regulación del nivel de agua. El circuito de bombeo proporciona caudales desde 0 a 180 l/s. El caudal deseado se alcanza lentamente para mantener sin erosión el experimento durante la puesta en marcha. La instalación se encuentra en la Universidad da Beira Interior en Covilhã (Portugal).

El material aluvial del río Ebro en Zaragoza parece ser una grava media-gruesa de tamaño $D_{50} = 16.6$ mm y desviación típica adimensional $\sigma_D = 3.83$ (D_x es un percentil tal que el x% del peso es menor y $\sigma_D = (D_{84} / D_{16})^{1/2}$). Al ser $\sigma_D > 3$ debemos considerar que es posible el acorazamiento del material aluvial. Para el modelo se ha elegido una arena media, natural y muy uniforme con $D_{50} = 1.28$ mm y $\sigma_D = 1.47$, con la que no hay fuerzas cohesivas ni tampoco formación

de arrugas. El tamaño de la arena no respeta la semejanza geométrica con las gravas del río Ebro; si se hubiera respetado, la arena del modelo habría sido tan fina (del orden 0.3 mm) que no se garantizaría la ausencia de cohesión y arrugas y además sería arrastrada por el flujo (como la grava del prototipo en avenida). La escala del tamaño de grano (16.6/1.28) es alrededor de la cuarta parte de la escala geométrica del modelo, o sea que el material granular en el modelo está exagerado en tamaño unas cuatro veces. Se cree que este tipo de exageración no altera la semejanza en la erosión local, excepto en el caso de pilas muy grandes en relación al grano[6], donde se ha visto que la erosión no se incrementa tanto con la anchura como se podría esperar. Se deduce que el modelo puede dar por este motivo erosiones más grandes que el prototipo (donde la pila es muy grande en relación al grano). La uniformidad de la arena (a diferencia de la grava de prototipo) asegura que en el modelo no se produce freno a la erosión local por acorazamiento del lecho. La erosión en el experimento puede ser mayor por este motivo que la real, es decir de nuevo el modelo estaría del lado de la seguridad.

Con respecto a los mantos de escollera, la semejanza se alcanza si la granulometría y la forma de los escollos es semejante y si es igual el coeficiente de rozamiento (mecánico) de la piedra. Falta considerar el sifonamiento o pérdida del substrato por el flujo entre los escollos, uno de los motivos de fallo de los mantos. Es más probable el sifonamiento en el prototipo que en el modelo porque el substrato del modelo tiene un tamaño exagerado. En el prototipo es necesario el filtro con más motivo que en el modelo. Como se iba a usar en obra un filtro de tipo geotextil entre la escollera y el substrato, se opta por usar también filtro geotextil en el modelo y dejar así de simular el fallo por sifonamiento. Este filtro no guarda con el prototipo semejanza en cuanto al espesor o la flexibilidad.

El modelo debe seleccionar la parte del río que influya sensiblemente en los fenómenos que se estudian. La atención a la pila hace aparecer menos relevante el meandro de Ranillas (fig.3), saliendo del cual el río se encamina recto hasta el Pabellón Puente a lo largo de una distancia suficiente para que el flujo en curva no sea relevante. Aguas arriba, el vano del puente del Tercer Milenio marca además una dirección recta a la corriente de aproximación (fig.1). Un estudio bidimensional[7] probó que el río apenas des-

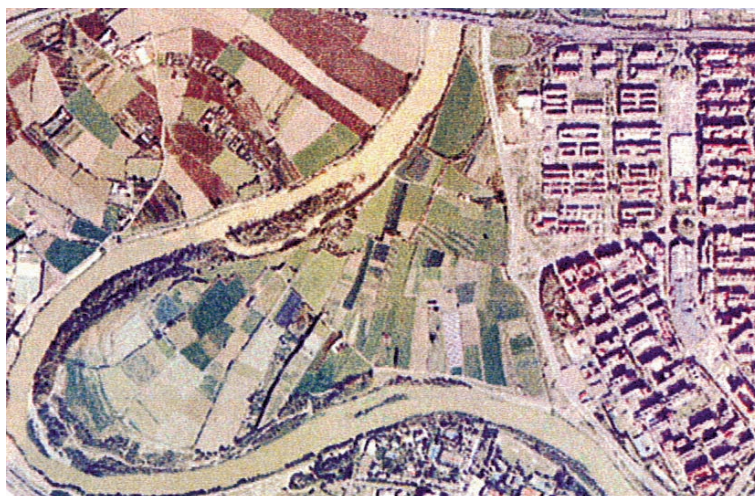


Fig.3. Meandro de Ranillas. Abajo en el centro se aprecia la isla.

borda respecto a su cauce con el caudal de proyecto. Esto facilita el estudio porque no hay que considerar planicies inundables sino aprovechar toda la anchura del canal recto como cauce del río. Siguiendo con la geometría fluvial, se desprecian diversas irregularidades del fondo excepto la isla, quizás efímera pero no tan irrelevante como otras formas. Si se toma un lecho plano sin isla, se puede estudiar de una manera más directa la erosión, pero el resultado final aplicable a la obra debe considerarla. La margen izquierda, tan cercana a la pila que la margen y la pila pueden llegar a influirse, la orilla derecha cuya posición da la anchura total del río y finalmente la isla, se representan en el modelo.

El calado y la velocidad del flujo en el río para el modelo se toman de la sección de Hec-Ras situada inmediatamente aguas abajo del puente (a 20 m) para el caudal de 500 años de periodo de retorno del río Ebro en Zaragoza: 5.222 m³/s. Se suma 0.54 m al calado para tener en cuenta la erosión general transitoria. El modelo por sí mismo no puede simular de ninguna manera esta erosión, que existiría en el río por efecto del flujo y el transporte sólido durante la circulación de una avenida. Pero entonces surgen dos dificultades: i) para mantener la semejanza de Froude en esta sección erosionada hay que modificar la velocidad media y el caudal de ensayo, ya que el área se ha incrementado por erosión del fondo y ii) nada puede decirse con seguridad de la forma de la sección erosionada. Para resolverlas se ha optado por asimilar la sección del río a una sección trapezoidal equivalente (fig.4). Por ello, de Hec-Ras se toma: el calado medio $y_m = A/B = 7.67$ m, en donde A es el área de flujo y B =

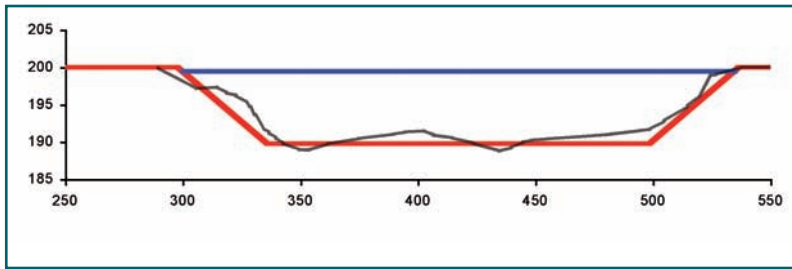


Fig.4. Sección del río y sección trapecial equivalente

234 m es la anchura de la superficie, la velocidad media $v = Q/A = 2.90$ m/s, en donde Q es el caudal de proyecto y el número de Froude 0.33. El calado medio, área, velocidad y caudal del modelo se obtienen a partir de los valores incrementados por la erosión en prototipo. El número de Froude se mantiene igual entre prototipo sin y con erosión general, entre prototipo y modelo y entre sección real y sección equivalente en modelo. Esto implica que no cambie A ni B , ni su cociente γ_m ; tampoco cambia la velocidad, pero sí el calado. La segunda componente de la erosión, por estrechamiento, sí se simula. En lugar de imponer su valor de cálculo se espera obtenerla del modelo. Esta erosión es también importante porque se recomienda que las protecciones de escollera se sitúen a la profundidad que resulta de la suma de la erosión general y por estrechamiento. Así no se obliga a un manto de escollera local a adaptarse también a los efectos del descenso general del fondo. Ante esta acción, la es-

collera puede o no resistir, pero en todo caso el manto alrededor de una pila no se proyecta contra esa amenaza.

Los factores para elegir la escala del modelo reducido son: *i)* que la arena elegida esté en el inicio del movimiento; *ii)* el aprovechamiento máximo de la anchura del canal; *iii)* el caudal disponible en el laboratorio (≈ 180 l/s); *iv)* la garantía de precisión en las medidas verticales (de erosión y sobreelevación), muy sensibles en un modelo pequeño y *v)* que el movimiento sea turbulento desarrollado. El caudal incrementado por incorporar la erosión transitoria es el factor limitante. Entre las escalas posibles, del orden de 65, se ha elegido finalmente la escala 62.5 para facilitar la construcción de los 10 pilotes de diámetro 2.0 m usando tubo comercial de PVC de 3.2 cm de diámetro exterior. Con esta escala el inicio del movimiento se alcanza con un defecto del 1-5% con respecto a la velocidad crítica observada que vale 0.36 m/s. El calado medio de prototipo $\gamma_m = 7.67 + 0.54 = 8.21$ m se convierte finalmente en $\gamma_m = 9.69$ m (15.50 cm en el modelo) de un trapecio. Esta es la condición de contorno aguas abajo. La turbulencia es desarrollada pues $Re > 5000$, aunque el número de Reynolds granular vale ≈ 30 . Esto implica que los efectos viscosos en el fondo del modelo son relevantes, pero sólo en el lecho fuera del foso, ya que en los fenómenos de erosión local, dominados por el sistema de vórtices que se generan alrededor del obstáculo, las fuerzas viscosas son despreciables[8]. Al ensayar cerca del inicio de movimiento, no hay necesidad de respetar la movilidad del material en general sino que basta fijarse en el fenómeno local.

Se distinguen en el Pabellón Puente las partes mojadas (cáliz y parte del tablero) y las no mojadas. La fig.5 son las secciones horizontales del objeto representadas una en el interior de la otra. La primera rebanada es el plano de arranque de los pilotes; la última se corta a la cota 200.00, mientras 199.44 es la cota de la superficie libre del agua aguas abajo del puente. El canto de la pieza mojado por el agua es 6.94 m aguas abajo y el canto total es 7.50 m (12 cm en el modelo). La masa de la maqueta entre dos plantillas de madera, superior e inferior, es de espuma. Con capas de resina y fibra de vidrio sobre este cuerpo se ha ido creando la superficie exterior con la debida precisión, resistencia e impermeabilidad. La rebanada superior del mo-

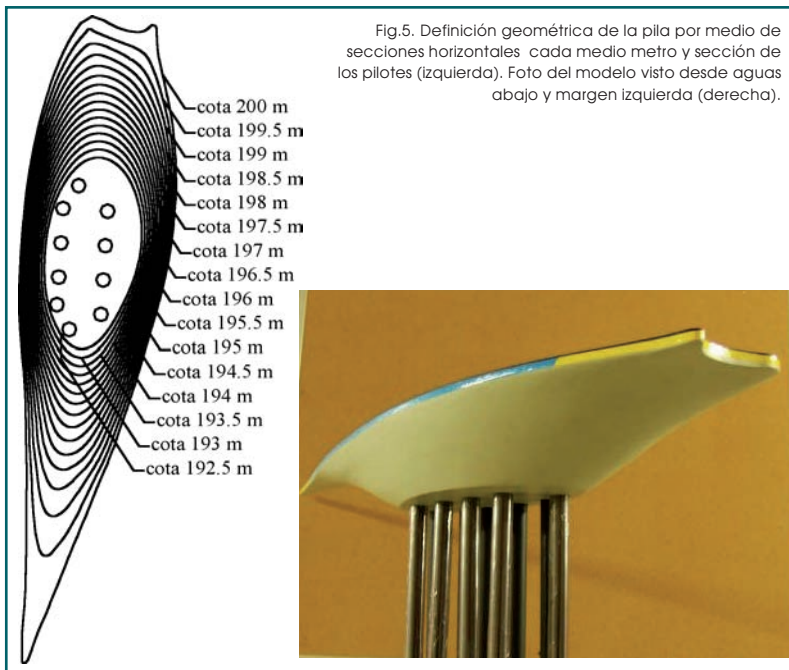


Fig.5. Definición geométrica de la pila por medio de secciones horizontales cada medio metro y sección de los pilotes (izquierda). Foto del modelo visto desde aguas abajo y margen izquierda (derecha).



Fig.6. Ensayo de erosión local. Foto tomada en las primeras horas de ensayo.

delo se repite igual a sí misma 9 mm más arriba. Esto sirve para dar consistencia y rigidez a una pieza que de lo contrario sería aguda y fina como un cuchillo. Asimismo este centímetro de más en el canto sirve para contener el agua que, prácticamente parada en contacto con la pila, treparía y pasaría así por encima de la plantilla superior.

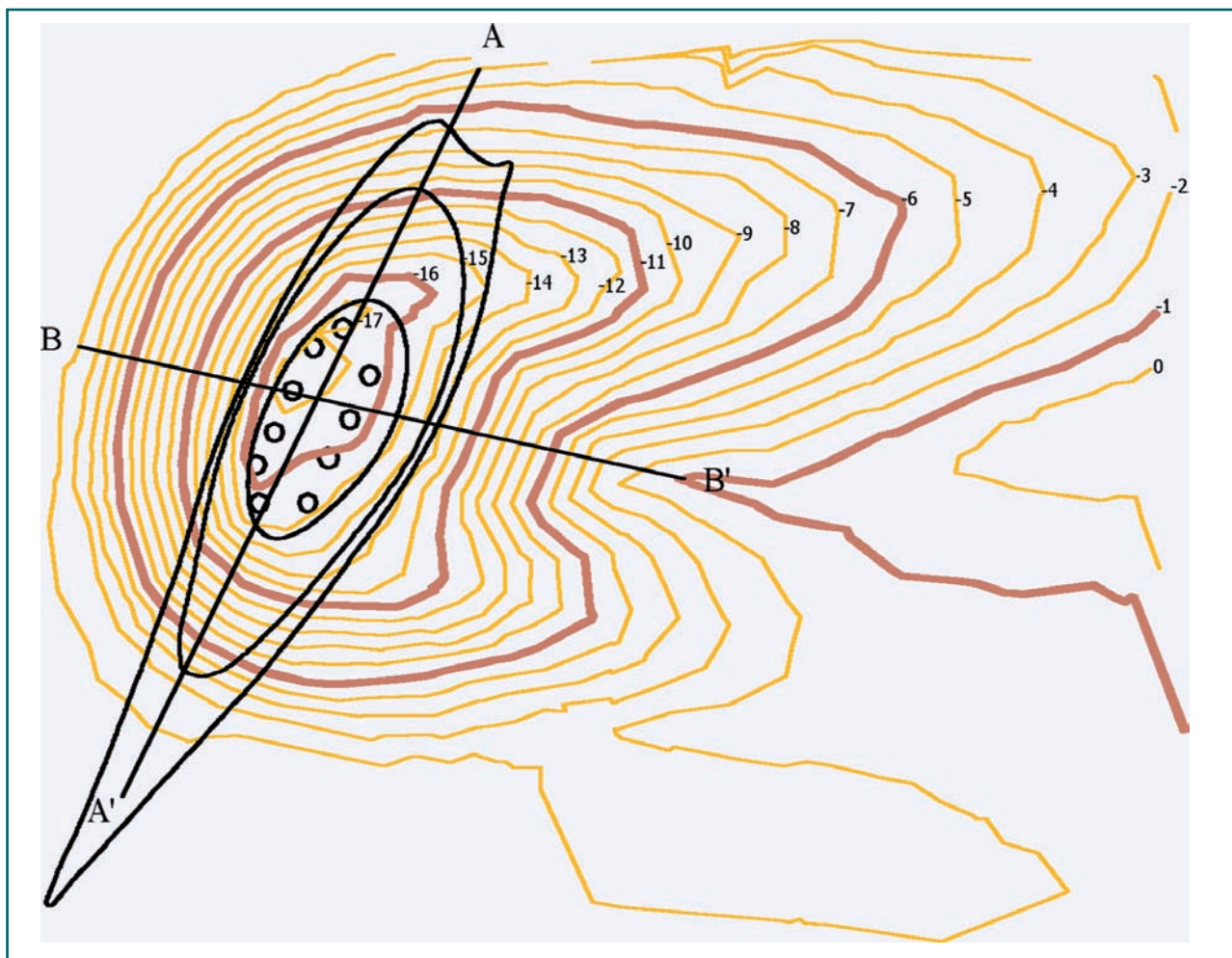
El modelo colocado en la zanja de arena deja un espacio erosionable de 85 m aguas arriba, 105 m aguas abajo y más de 40 m de profundidad en prototipo. No se reproduce la pendiente de energía del río Ebro (20 cm/km) porque el error cometido con el canal horizontal es mínimo. Las márgenes se han construido en madera (con talud 1:0.27 y la rugosidad apropiada), considerando que su eventual erosión no tiene efecto en el desarrollo de la socavación en la pila ni en el comportamiento de los mantos de escollera. Se usa para los mantos árido de construcción de machaqueo con aristas agudas. El levantamiento de los fondos erosionados en

los ensayos se realiza con topografía tradicional. La medida de velocidades se hace con un velocímetro acústico Doppler (ADV) que determina las tres componentes del vector. La frecuencia de medida ha sido 25 Hz. No es posible medir más cerca de 4 cm de la superficie libre ni más cerca de 3 cm del fondo; estas son las distancias "ciegas" para el instrumento. La medida de la superficie libre y del fondo (y como resta de ambas, la medida del calado) se hace con limnómetro provisto de nonius (resolución 0.1 mm).

C. Ensayos y protección recomendada

Los ensayos del modelo se han realizado entre el 18 de abril y el 12 de mayo de 2008. El primero ha sido sin puente para comprobar el inicio del movimiento de la arena y la distribución uniforme del flujo en la aproximación. El primer ensayo propiamente

Fig.7. Topografía del foso de erosión local por planos acotados, referida al fondo inicial del ensayo (cota 189.75, prototipo). Flujo de izquierda a derecha: la margen izquierda queda arriba y el centro del río abajo. Se representan los pilotes y las secciones horizontales principales del cáliz. La equidistancia es 1 m (líneas finas).



te dicho es el de erosión local de la pila, en un cauce equivalente (trapezoidal con la erosión general). El calado de 9.69 m aguas abajo abraza 2.75 m de pilotes más los 6.94 m del canto de la pila. En cuanto comienza el ensayo, de 48 h, se aprecia el movimiento de arena en el frente del cáliz que va descubriendo los pilotes (fig.6). El agua se ajusta casi exactamente con la rebanada superior de la pieza. Se aglomera y trepa un poco en la zona de parada sin superarla. La superficie libre está bastante agitada detrás del obstáculo y en la estela de remolinos desprendidos por el extremo izquierdo.

La máxima erosión bajo el cáliz medida al final del ensayo es de 17.5 m, con respecto al fondo inicial (la longitud de pilotes descubierta es 17.5 m + 2.75 m = 20.3 m). La preocupación despertada por el cálculo se ve pues confirmada por el modelo reducido. La topografía detallada del fondo (fig.7) muestra la distribución de la erosión. Se observa un solo foso centra-

do en los diez pilotes, en donde la profundidad es máxima, sin distinguirse fosos de erosión particular de cada uno. La forma de la concavidad parece determinada por la forma del cáliz en la parte inferior y apenas por la forma tan alargada de la superior. El talud máximo de la arena se da desde el borde de aguas arriba del foso hasta el fondo, es decir al "entrar" al foso. Aunque la diferencia es pequeña, los pilotes más cercanos a la margen izquierda y los de la hilera de aguas arriba están algo más erosionados que los demás. Con la fig.7 se calcula un volumen de material erosionado de 43.500 m³, que equivaldría a un cubo de más de 35 m de lado. La superficie total de fondo erosionado es algo más de 1 Ha.

El foso único se prolonga aguas abajo por la izquierda alcanzando la margen con una pequeña erosión que hace caer algunas de las piedras que la recubrían con el fin de crear rugosidad (fig.8). Esto indica que la presencia de la pila no es indiferente para

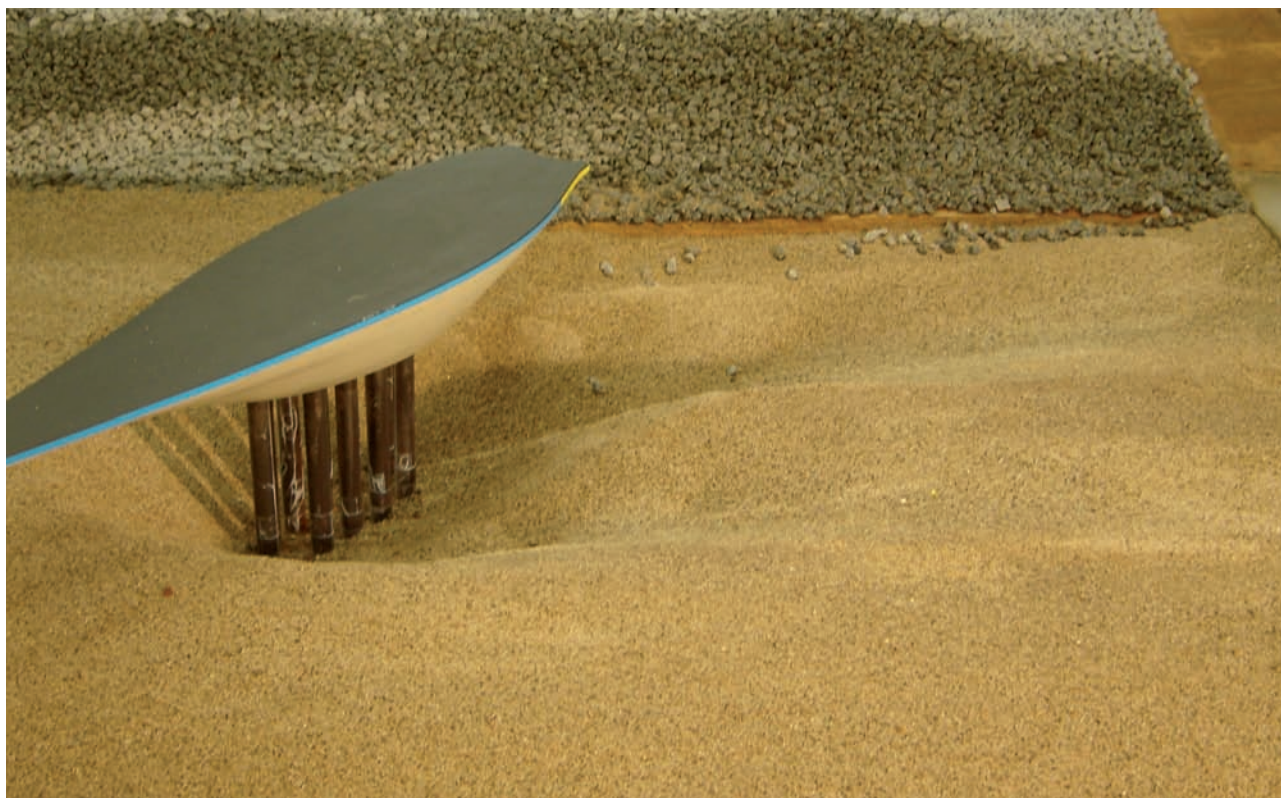


Fig.8. Estado final del ensayo de erosión local. Ver la enorme longitud de pilotes descubiertos y la pequeña erosión de la orilla izquierda aguas abajo de la pila.

la margen aguas abajo del puente. Otro resultado importante del ensayo es que lejos de la pila no hay erosión alguna a pesar de la gran obstrucción y de la larga duración del ensayo. Toda la deformación del fondo ocurre en la mitad izquierda del río y nada en la mitad derecha (fig.8). La erosión por estrechamiento es nula. Por tanto, la cota superior de colocación de los mantos de escollera será la del lecho menos la erosión general transitoria (0.54 m).

Tras este ensayo, se realizaron otros 9 ensayos para proyectar los mantos de escollera de protección, siguiendo la estrategia de separar los dos motivos principales de fallo: el arrastre de escollos y la falta de una extensión suficiente del manto. En los primeros ensayos, de fallo por arrastre, el objetivo es determinar el peso de la escollera que aguanta la acción del flujo. Que interese el peso no significa que se ensaye un sólo elemento sino un manto completo, ya que en la resistencia interviene la interacción entre escollos. Pero para que no influya la extensión, el manto ocupa toda la zanja de arena, como si fuera "infinito". Al estar la erosión general incorporada en el modelo y ser nula la erosión por estrechamiento, el manto se coloca a la cota del fondo del cauce equivalente. El criterio de fallo de la

protección es que se vea el movimiento de algún escollo, aunque sean pocos. El caudal se deja corriendo mucho tiempo excepto si se rompe rápidamente el manto, en cuyo caso se pasa a la piedra de peso superior. La escollera de 200 kg tuvo que rechazarse debido a los desplazamientos observados, pero la de 600 kg resistió por peso la acción del agua durante 12 horas. El espesor del manto no se investiga en el modelo porque en el prototipo se van a poner filtros para combatir el fallo por sifonamiento, tipo de fallo ante el que el espesor o número de capas es sensible. En los ensayos los mantos se forman siempre con dos capas de material sobre el geotextil. El espesor del manto para el peso de 600 kg es de 1.50 m, respetando el criterio de $2D_{50}$. Este criterio atiende a la estabilidad del manto pero también se considera necesario para que el geotextil se mantenga inmóvil, sin ocasionar su movimiento acciones mecánicas al manto. Se ha controlado que la granulometría en los ensayos cumpliera el huso establecido (fig.16)[2].

Los siguientes ensayos sirvieron para determinar la extensión necesaria del manto de 600 kg. El manto no falla ahora por falta de peso sino porque los escollos de los bordes son desplazados y caen hacia

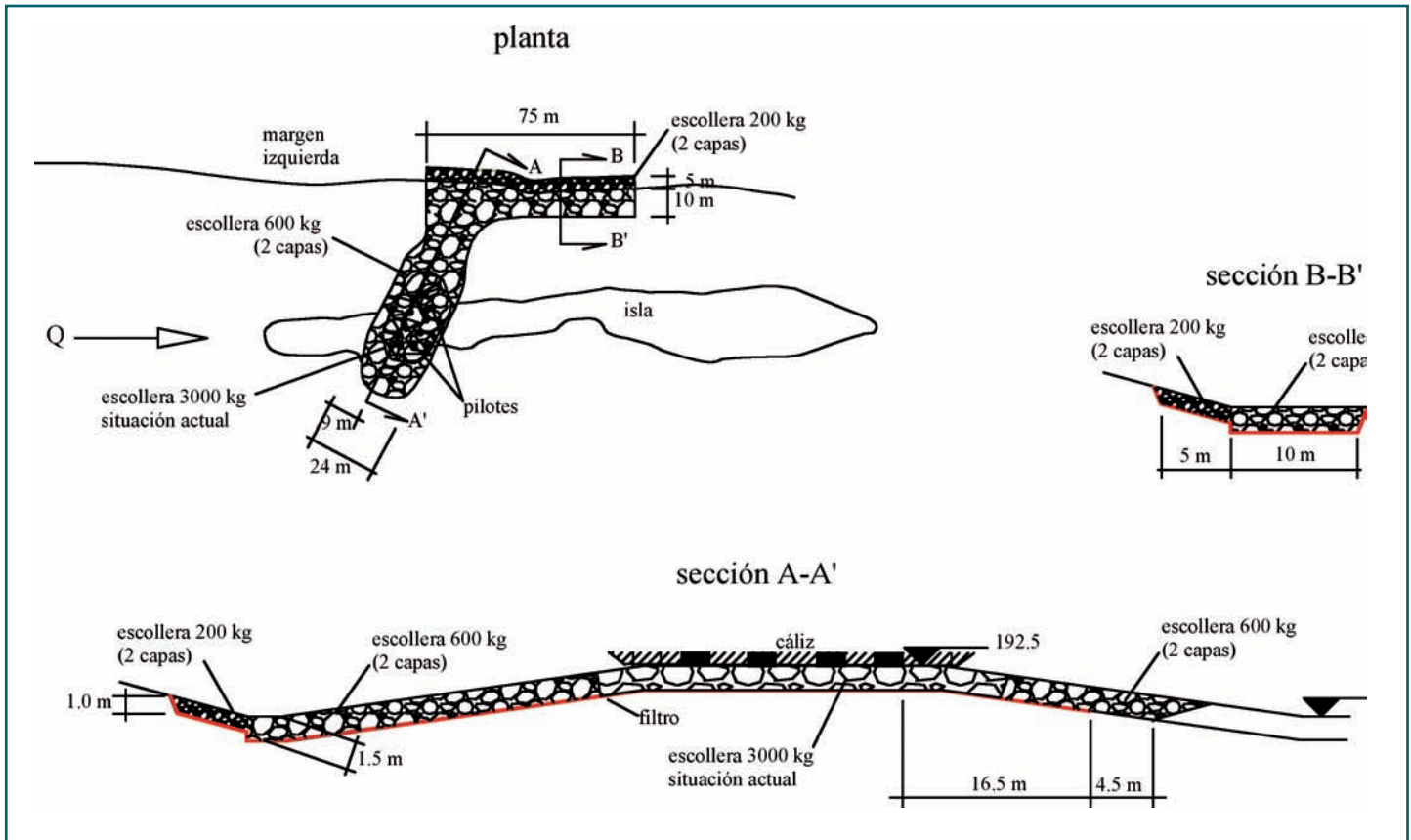


Fig.9. Croquis no a escala de la escollera proyectada para la pila y margen izquierda según el modelo reducido. La "cota del terreno" es ≈ 188.90 .



Fig.10. Protección recomendada tras horas de ensayo. Roja: 3000 kg; amarilla: 50% de anchura en 600 kg. Se ve el filtro en el pie de la margen, sin que caiga la protección. Se distingue muy bien, tras la pila, la meseta.



Fig.11. Vista desde aguas arriba del foso derecho una vez terminado el ensayo.

las áreas que rodean la pila, en donde se pueden desarrollar también fosos de erosión. Un manto de escollera consigue suprimir la erosión local alrededor de una pila pero tiene como consecuencia indeseada la formación de otros fosos de erosión a los lados, como un precio que hay que pagar por el éxito de la protección. En consecuencia, estos ensayos han de ser de larga duración, para que los fosos se desarrollen plenamente y haya más propensión a la pérdida de escollos, y es necesario un criterio de fallo más elaborado. Pretender que no se muevan las partículas en absoluto llevaría a mantos de extensión "infinita" (ocupando todo el cauce). El criterio se establece en términos de una anchura del manto que se puede perder sin amenazar la integridad de la protección: el 50% de la anchura medida desde cada pilote[9]. Si se pierde menos de un 50% el manto ha resistido y si se pierde más ha fallado. En el primer caso puede ahorrarse en extensión pues no se ha agotado la resistencia del manto; en el segundo caso debe aumentarse. El 50% perdido en el límite es como una anchura "de sacrificio" que es preferible dar por perdida, o no esforzarse en conservar, porque los fosos laterales no se pueden suprimir. En estos ensayos se intenta un ahorro en volumen de material a base de buscar el manto mínimo necesario para la estabilidad. Se empieza ensayan-

do una extensión escasa para descartarla tras poco tiempo de ensayo y seguir hacia una extensión suficiente.

Cuando se determinó que un manto de 20 m de anchura alrededor de la pila era suficiente, se pasó a incorporar dos elementos más de la realidad: *i)* la geometría alrededor del puente con un detalle mayor, necesario para afinar y verificar la solución. *ii)* la escollera provisional que había sido colocada en obra después de comenzar los ensayos. En cuanto a *i)*, se modela la pequeña isla en la que se apoya la pila, lo que significa abandonar la sección trapezoidal equivalente que incluía la erosión general. Este cambio de concepto implica también un cambio en el ensayo hidráulico: el caudal no se ha de incrementar y no se usa un calado medio incrementado con la erosión sino el calado absoluto obtenido con Hec-Ras (10.62 m desde la superficie libre al thalweg). Además, la escollera se coloca en la superficie de la isla, lo que representa ataluzarla ligeramente desde la pila hasta la cota del manto ensayada antes. En cuanto a *ii)*, en Abril de 2008 se estaba soldando el cáliz alrededor del encepado, trabajando sobre una península de tierras que ocupaba parte del cauce; después de soldado iba a ser imposible realizar obra alguna por debajo, ni siquiera una escollera de protección; por ello, la dirección

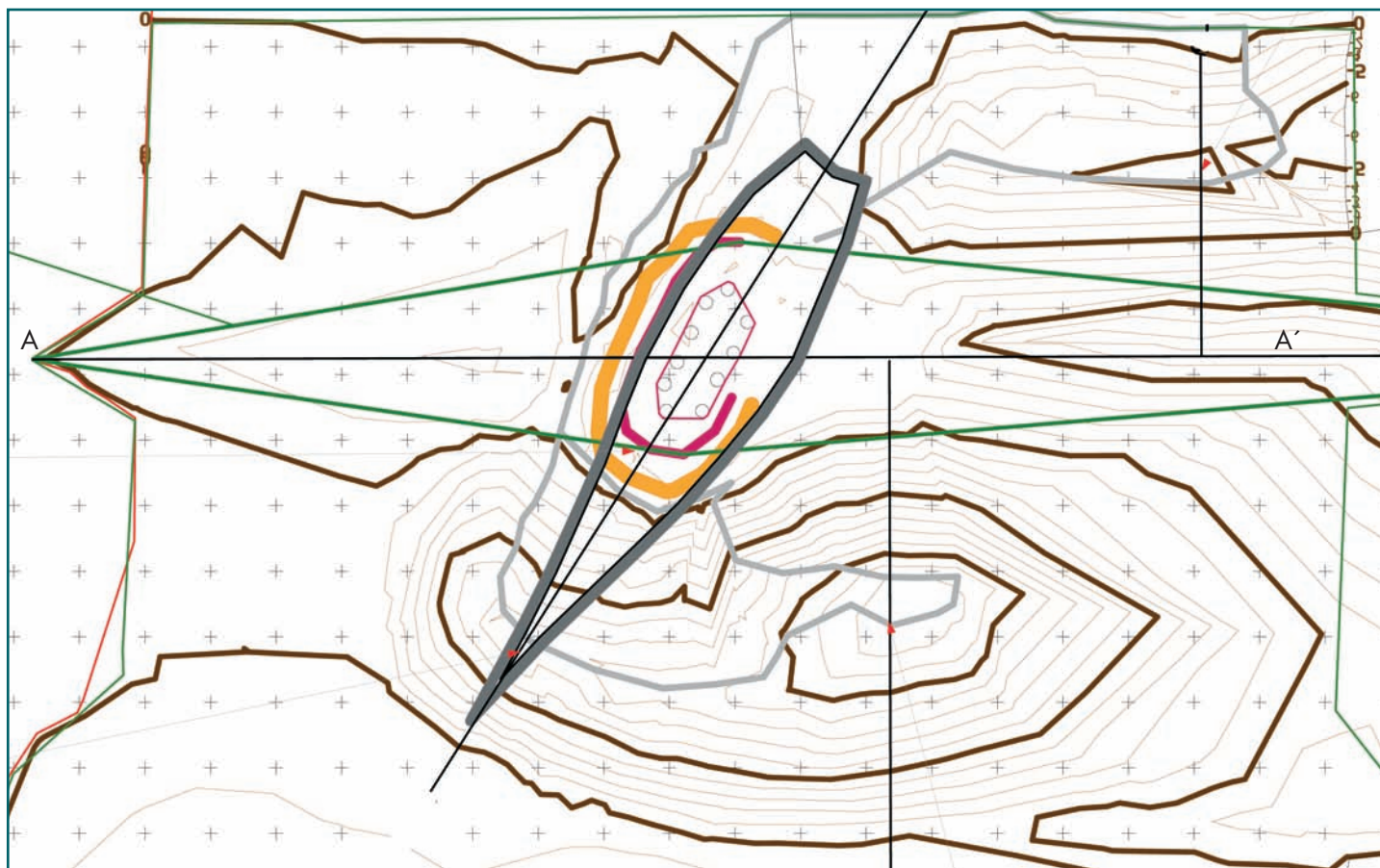


Fig.12. Topografía del estado final tras el ensayo definitivo por planos acotados. Flujo de izquierda a derecha. Se representan los pilotes, el encepado que los abraza y la rebanada superior de la pieza. La línea roja representa la piedra de 3000kg (roja en el modelo, fig.10), la línea amarilla el 50% de piedra de 600 kg del manto proyectado (idem) y el contorno gris el resto de piedra de 600 kg, incluso la que ha rodado a los fosos. La línea verde es la isla. La equidistancia es 1 m (líneas finas). El cero a cota 192.50 es la línea fina que coincide con la roja.

de obra ordenó una protección en la anchura mínima y con el tamaño máximo practicable (3.000 kg); se pensaba que seguramente haría falta más extensión de escollera pero no escollos más pesados, de modo que el manto final consistiría en complementar esta protección. Además de la pila, también se modela una protección de la orilla izquierda que sufre caída de partículas por fallo del substrato de arena, erosionado por el foso lateral. La protección final recomendada (figs. 9 y 10) tiene unos mantos de 600 kg alrededor de la escollera ya colocada, un pie (600 kg), un revestimiento en el talud hasta poca altura (200 kg) y una escollera de unión de los dos mantos.

Al poco tiempo de comenzar el ensayo de esta solución, se aprecia que la arena de la isla que cubría los mantos es rápidamente arrastrada. Detrás de la pila se forma una "meseta" seguida aguas abajo por una cresta de más de altura y longitud

que la isla inicial (fig.11) donde se acumula el material de los fosos. En cuanto a la orilla, el pie se sacrifica en parte, basculando o rodando hacia el foso (se descubre el filtro), pero sin permitir la caída del revestimiento que tampoco falla por peso. La unión de los mantos sirve para moderar la profundidad del foso izquierdo. En la fig.11 se ve que al foso de la derecha, el mayor de los dos, no ha caído ni está a punto de caer ninguna piedra amarilla, por más que el filtro (colocado hasta el 75% del total de la anchura) esté al descubierto. El comportamiento satisfactorio en un ensayo bastante largo (33 h), lleva a considerar este resultado como el punto final del trabajo en el modelo reducido.

Las anchuras de los mantos finales (fig.9) son 9 m en los lados de aguas arriba y abajo, 21 m en el lado del centro del río y un manto unido a la orilla en el lado de la margen izquierda (de más de 21 m). Los ahorros con respecto a los mantos proyectados son muy

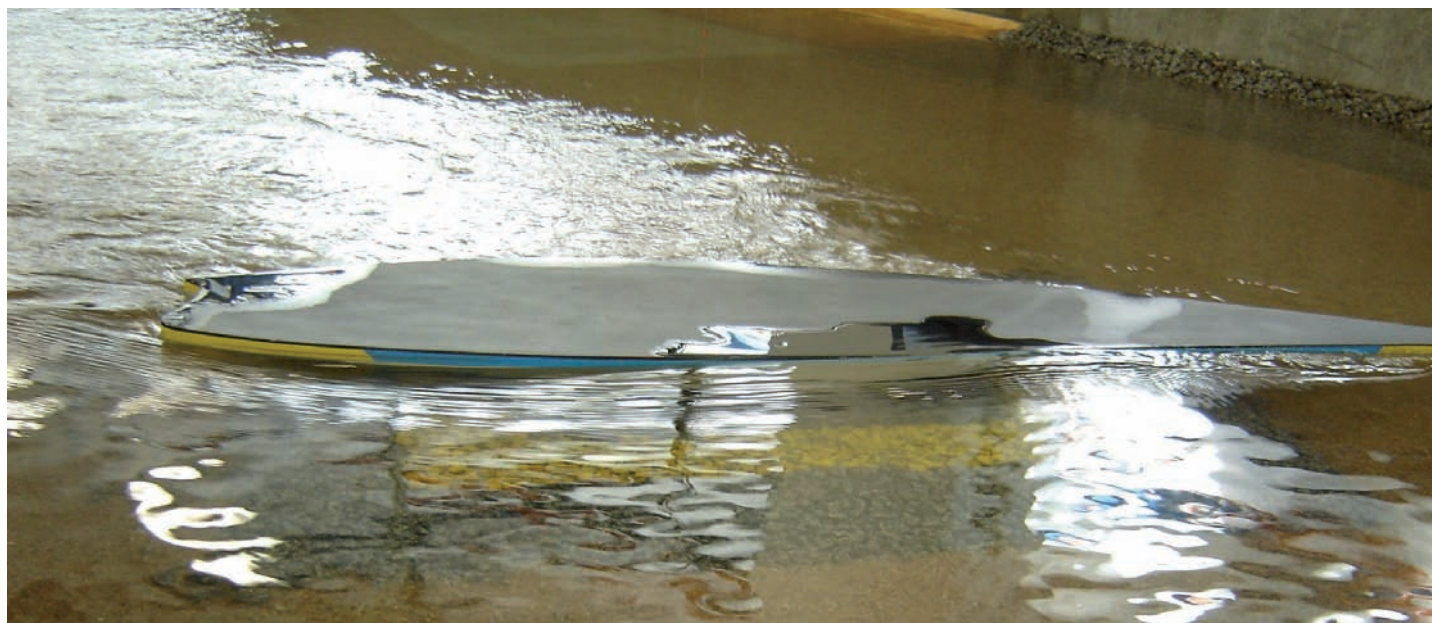


Fig.13. Vista desde aguas arriba del flujo, con ascensión en la zona de parada.

importantes, porque llegaban a medir algo más de 50 m aguas arriba y abajo y algo más de 30 m en centro y margen. En los lados largos de arriba y abajo es notable que la anchura (9 m) es mucho menor que la magnitud de la erosión local (17.5 m), criterio habitualmente utilizado para dimensionar un manto[1]. En cambio, en los lados cortos de los costados, por donde busca su salida el agua debido a la gran obstrucción causada por la pila, la anchura necesaria del manto final (21 m) sí es comparable a la profundidad del foso (17.5 m) como dice el criterio general. Lo que esto indica es que la pila es tan larga que se comporta casi como un obstáculo a modo de estribo por los dos extremos. Si la pila fuera aún más larga, como una barrera en el río, casi no sería necesaria la escollera en el centro del obstáculo sino sólo en los dos extremos (estribos). La anchura en los costados parece crítica para el éxito de la protección.

La topografía de la fig.12 muestra unos relieves más abruptos que el suave foso de erosión local (fig.7). Aquél se separaba progresivamente en dos concavidades, mientras ahora los fosos están divididos nítidamente y aparece la cresta aguas abajo de la pila. El foso de la izquierda, menos profundo, pasa de 7m; el foso de la derecha alcanza casi 15 m, a contar ambos desde la cota 192.50 de la base del cáliz. Bajo la sombra del tablero del puente, se miden ya casi 10 m de erosión. La forma alargada de los fosos recuerda las dos salidas que encuentra

el agua, por la derecha e izquierda de la pila, la primera en fondo erosionable y la segunda con escollera. La cresta alcanza ya los 6 m de altura respecto a la misma cota del cáliz. La alteración del fondo que produce el puente debe interesar a la autoridad hidráulica en caso de autorizaciones de actividades en su zona de influencia. El relieve registrado, que obedece al flujo de una avenida simulado por un ensayo de larga duración, pertenece a un sistema en equilibrio. Una excavación en la cresta o en la isla actual, un dragado, una invasión del cauce o el relleno de un foso, un canal de navegación o un acopio en las orillas, un encauzamiento o un estrechamiento local, etc. no son indiferentes para la estabilidad del manto de protección de la pila. Naturalmente aún es más delicada cualquier acción sobre la escollera.

Se ha medido la sobre elevación causada por el puente con las protecciones y los fosos de erosión desarrollados. A la izquierda la superficie libre está más alta que a la derecha, pero en media la diferencia es de 26 cm. En la zona de parada frente a la pila (fig.13), la ascensión del agua alcanza casi 70 cm. Por su parte, la medida de velocidades tiene el objetivo de comprender la alteración del flujo en el río en la zona del puente. El comportamiento del fondo erosionable y de los mantos se podrá explicar mejor si se conoce cómo es el movimiento del agua. En la fig.14 se representa el vector velocidad proyectado en el plano horizontal con una escala gráfi-

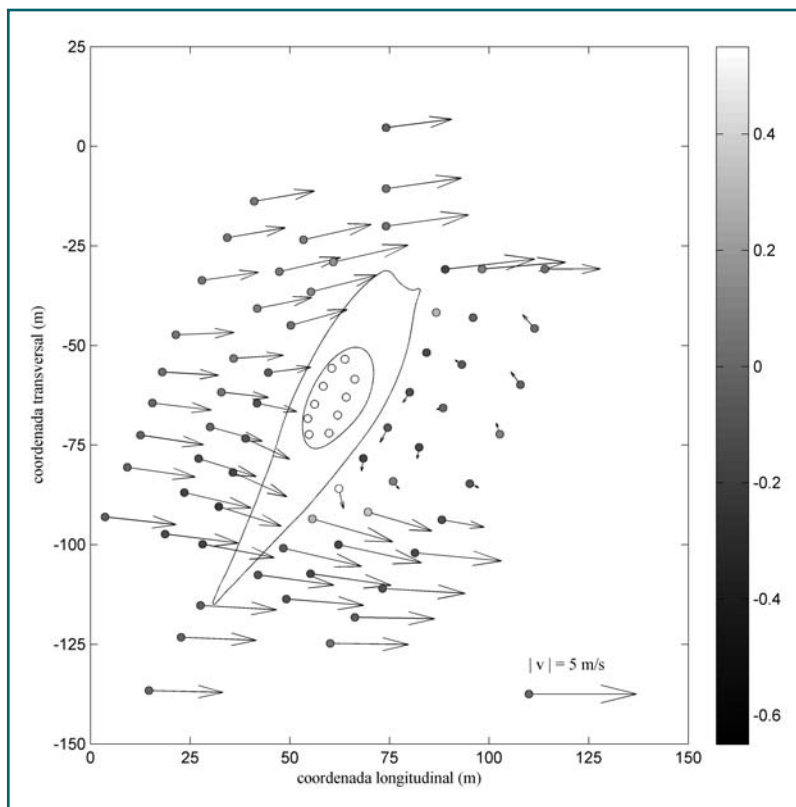


Fig.14. Campo de velocidades a 3.1 m de profundidad. Se dibujan los pilotes y las rebanadas extremas de la pieza.

ca para el módulo (flechas). Además, el módulo de la componente vertical (con su signo) se da por medio del sombreado del círculo a la escala de grises representada a la derecha. Se observan algunos rasgos hidrodinámicos sobresalientes: *i)* aguas arriba de la pila el agua se orienta ligeramente a derecha o izquierda; hay un ligero frenado de la corriente en el centro pero una aceleración y desviación en los lados; las velocidades máximas se dan en esas corrientes desviadas un poco después de pasar la pila y a la derecha se dan las mayores velocidades verticales negativas (hacia el fondo); la desviación persiste más a la izquierda que a la derecha; *ii)* la línea de corriente de separación entre los tubos de flujo que sortean el obstáculo por la izquierda y la derecha indica que todo el flujo encaminado en principio a la parte de la pila sin paso de agua la sortea por la derecha; esto es consecuente con un foso mayor a la derecha; *iii)* detrás de la pila hay una "sombra" de agua prácticamente parada pero con una ligera circulación en sentido antihorario bien organizada, que coincide con la "meseta" observada en la morfología final.

D. Ejecución de la protección, prueba y auscultación

Desde el punto de vista de ejecución de la protección de escollera, como se ha indicado la pila presentaba el problema de colocar parte del manto bajo el cáliz metálico que cubre el encepado y los pilotes. La ejecución inicial de la protección en Abril suponía la dificultad de excavación desde la propia península hasta las cotas inferiores de los mantos, los cuales se encontraban bajo el nivel del río en ese momento. La apertura de vías de agua en el interior podía suponer desmoronamientos parciales del material de la ataguía que dificultarían aún más el trabajo acuático que se debía desarrollar (fig.15). Por ello finalmente se adoptó como procedimiento constructivo el avance por bataches para delimitar las posibles zonas afectadas y la evacuación parcial del agua mediante bombas de achique. La consolidación de las zonas excavadas una vez instalada la escollera y efectuado el relleno sobre la misma, permitió el avance sobre ellas de la propia maquinaria y la reducción de riesgos de desmoronamiento del terreno. El trabajo bajo el tablero del puente en las zonas de gálibo más reducido, en combinación con los tamaños importantes de escollera a movilizar, supusieron la mayor dificultad en el desarrollo de esta primera protección.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos cuando estaba ya soldado todo el cáliz metálico, se



Fig.15. Encepado (color negro) y tablero (rojo) dentro de la excavación tras la colocación de la primera escollera, antes de soldar el cáliz.

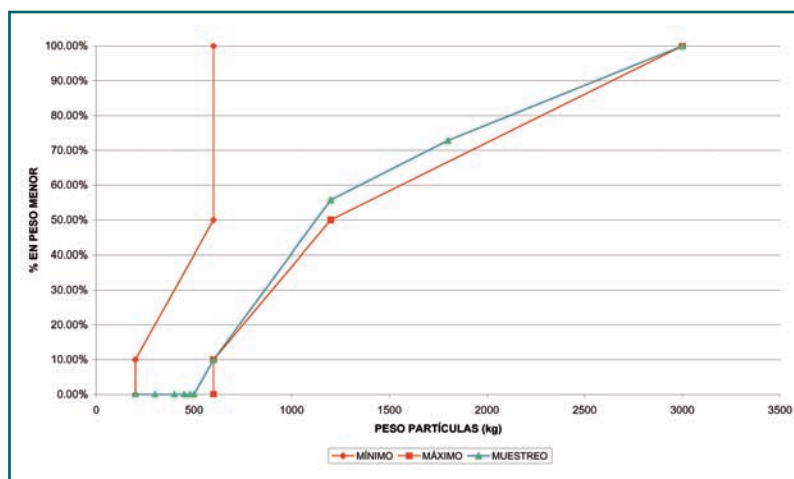
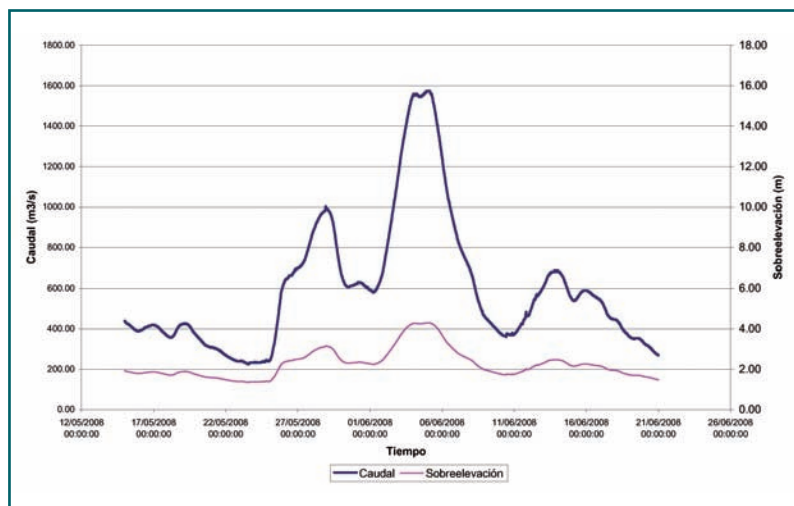


Fig. 16. Granulometría de la escollera colocada en la protección de 600 kg.

procedió a la ejecución de la segunda corona de protección de escollera (600 kg). La protección de la península, en retirada en ese momento tras la ejecución de la estructura, disponía de escollos que cumplían el huso requerido para la protección (fig.16), lo que permitió acelerar los trabajos y simplificar la logística de acceso a la obra de vehículos pesados sobre zonas ya pavimentadas del recinto, al mismo tiempo que se reducían los trayectos de carga y descarga.

El día 3 de junio de 2008, a menos de 15 días de la inauguración de la muestra internacional, el Ebro presentó una avenida de un caudal punta de 1.575 m³/s (fig.17), coincidente con las últimas actividades de retirada de la península y cubrición de la escollera ejecutada. El riesgo de una avenida sin estar concluida la protección de escollera habría sido un desarrollo parcial de los importantes fosos de erosión

Fig. 17. Hidrograma de la avenida del 3-4 de junio de 2008. Sobre elevación significa subida de nivel medio del río. Datos C.H.E. elaborados por EPTISA.



que se vieron en el modelo reducido, lo que podía llegar a suponer una situación de partida perjudicial para los propios mantos y crítica para su estabilidad futura frente a nuevas avenidas. Finalmente esta circunstancia, dado que sí se pudieron concluir las actuaciones de protección, gracias a los trabajos de la UTE Dragados-Urssa, se convirtió en una primera prueba real del comportamiento de la escollera. En la fig.18 puede observarse el nivel alcanzado por la avenida así como el estado de la protección una vez recuperados los niveles ordinarios. Esta crecida no afectó a la protección ni al Pabellón Puente.

Como se ha indicado antes, la protección de escollera frente a erosiones es efectiva siempre y cuando permanezca en su ubicación establecida. En caso de actuaciones en las proximidades que puedan suponer su alteración así como en caso de avenidas de periodos de retorno elevados, deberá realizarse una inspección del estado final de la protección. Existen modernas técnicas de medida mediante sondas de ultrasonidos sumergidas en las proximidades de los pilotes, que permiten detectar fosos de erosión en formación. Así se reduce la complejidad de la auscultación de la escollera por buzos experimentados en estas labores. En un futuro deberá analizarse la conveniencia de su instalación en estructuras singulares de este tipo para complementar las importantes labores de mantenimiento y de forma especial de inspección de la escollera tras episodios extraordinarios y actuaciones cercanas que por su naturaleza modifiquen el cauce del río.

E. Conclusión

La experiencia en hidráulica fluvial de estructuras complejas en medios aluviales, como es el caso del Pabellón Puente, se ha revelado crítica. Es importante destacar lo imprescindible de esta disciplina desde las etapas tempranas de concepción y diseño así como la inclusión de sus condicionantes en los cálculos de la propia cimentación. Casos como el Pabellón Puente demuestran que son equipos multidisciplinares lo que están llamados a ser los autores de los grandes retos de la ingeniería del futuro, en los que la especialidad de la hidráulica fluvial, para actuaciones en los cauces, ha de tener un puesto significativo como garantía de adecuación y segu-

Fig.18. Arriba: vista el día 3 de junio. Abajo: tras el paso de la crecida.



riedad de la obra en el entorno físico en el que debe implantarse.

Igualmente el caso del Pabellón Puente muestra que es extremadamente útil el ensayo en modelo reducido de situaciones de hidráulica fluvial no habituales. Las formulaciones existentes provienen del ensayo de casos tipo. Sólo el modelo físico reducido de los elementos especiales puede arrojar luz sobre la magnitud de su erosión potencial y de los medios de protección. La simplificación del proyecto de una protección de escollera tanto en extensión como en tamaño y espesor, reduce de forma significativa el coste y los plazos de ejecución, algo capital en una obra como el Pabellón Puente de la Exposición Internacional de Zaragoza 2008. ◆

Referencias:

- [1] Témez, J.R. (1988) *Control de la erosión fluvial en puentes*. Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- [2] Martín-Vide, J.P. (2002) *Ingeniería de Ríos*. Ed.UPC, Barcelona.
- [3] Richardson, E. V. y Davis, S. R. (2001). "Evaluating scour at bridges." *Hydraulic Engineering Circular No. 18* (HEC-18), 4th Ed., Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [4] Melville, B. W. y Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
- [5] Nicollet, G. *River Models*. Capítulo 2 de Martins, R. (ed) *Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling*. Nato ASI series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1989.
- [6] Sheppard, D. M.; Odeh, M. y Glasser, T. "Large scale clear-water pier scour experiments". *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130, 10,957-963
- [7] "Estudio hidráulico de avenidas del tramo del río Ebro correspondiente al meandro de Ranillas (Zaragoza)". Inclam para Expoagua Zaragoza 2008, S.A.
- [8] Simarro G., Teixeira, L. y Cardoso, A. H. (2007) "Flow intensity parameter in pier scour experiments". *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 133, No. 11, 1261-1264.
- [9] Fael, C.M.S. "Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção". Tesis doctoral, Universidade da Beira Interior, Covilhã 2007.