Editores Luis José Balairón Pérez David López Gómez

ACTIVIDAD EXPERIMENTAL DE I+D+i EN INGENIERÍA HIDRÁULICA EN ESPAÑA. RED DE LABORATORIOS DE HIDRÁULICA DE ESPAÑA. SEMINARIO 2013

EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Primera edición, 2015

- © Editores Luis José Balairón Pérez David López Gómez
- © de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València www.lalibreria.upv.es
- © Todos los nombres comerciales, marcas o signos distintivos de cualquier clase contenidos en la obra están protegidos por la Ley
- © de las fotografías: el autor

Imprime: Byprint Percom sl.

ISBN: 978-84-943649-5-2 Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores. Impreso en España



Actividad experimental de I+D+i en ingeniería hidráulica en España

SEMINARIO 2013. COMUNICACIONES DE LAS LÍNEAS PRIORITARIAS

- A. CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE ESPACIOS FLUVIALES.
- B. HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES.
- C. RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA.
- D. SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.

Madrid, 9 de julio de 2013

Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez

PRESENTACIÓN

La **Red de Laboratorios de Hidráulica de España** (RLHE), se constituyó en el año 2008 como un foro encuentro entre los principales Centros de Investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España.

Las instituciones que participan en la RLHE son el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y las Universidades de Castilla La Mancha (UCLM), A Coruña (UDC), Politécnica de Cataluña (UPC), Politécnica de Cartagena (UPCT), Politécnica de Madrid (UPM) y Politécnica de Valencia (UPV).

El objetivo principal de la RLHE es constituir un foro o espacio de encuentro entre los principales centros de investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España que permita detectar complementariedades, contribuir al fortalecimiento de la actividad de I+D en el campo específico de la ingeniería hidráulica e impulsar proyectos de investigación aplicada y de desarrollo tecnológico e innovación en común en las materias específicas de la Red.

Anualmente la Red celebra un Seminario en el que los distintos centros que la integran presentan la actividad en la que se encuentran involucrados ese año. En el año 2013 este Seminario se celebró en Madrid organizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. En esta publicación se recogen los resúmenes de las ponencias presentadas.

Luis Balairón Pérez

Coordinador de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España, RLHE

ÍNDICE

Resúmenes Línea Prioritaria A

Criterios hidromorfológicos para la restauración de espacios fluviales

EFECTO DE EROSIÓN LOCAL DE TRAVIESAS TRANSVERSALES EN ENCAUZAMIENTOS (David López, Rubén Díaz, Alba González, Francisco J. E. Redondo)	7
COMPARATIVA DEL FLUJO DE AGUA CLARA Y CON SEDIMENTOS A TRAVÉS DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO UTILIZANDO DATOS DE LABORATORIO Y MODELACIÓN NUMÉRICA CFD (<i>Luis G. Castillo, Juan T.</i> <i>García, José M. Carrillo</i>)	11
DIMENSIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE PILAS SIMPLES CON MANTOS DE ESCOLLERA SUPERFICIALES EN CONDICIONES DE "LECHO VIVO" (Álvaro Galán, Gema Sánchez, Javier González)	15
EROSIÓN LOCAL AGUAS ABAJO DE PUENTES CON SOLERA PROTEGIDA (Beatriz Nácher, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés)	19
SOCAVACIÓN EN GRUPOS DE PILAS DE PUENTE SOBRE CAUCES ALUVIALES (Pedro Millán, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés)	23

Resúmenes Línea Prioritaria B

Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses

Resúmenes Línea Prioritaria C

Riesgo asociado a la escorrentía urbana

CRITERIOS DE PELIGROSIDAD ASOCIADOS A LA ESCORRENTÍA URBANA (Beniamino Russo, Manuel Gómez, Francesco Macchione)	. 35
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE TRANSFROMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA Y FLUJO EN UNA RED DE DRENAJE. PROYECTO MODUS (<i>Ignacio Fraga, Luis</i> <i>Cea. Jerónimo Puerta</i> s).	. 39
Cea, Jerónimo Puertas)	. 39

Resúmenes Línea Prioritaria D

Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

.

ENSAYOS DE DETECCION DE PECES PARA ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL UTILIZANDO ESCÁNER LÁSER 2D (Juan R. Rabuñal, Daniel Villares, Álvaro Rodríguez, Ángel Rico, Luis Pena, Jerónimo Puertas)
INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE ESCALA EN LA SIMULACION NUMÉRICA DE ALIVIADEROS DE VERTIDO LIBRE (<i>Luis G. Castillo, José M. Carrillo</i>)
DISTRIBUCIÓN LATERAL DEL CAUDAL ESPECÍFICO EN ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES: RESULTADOS DEL PROYECTO ALIVESCA (Soledad Estrella; Martí Sánchez-Juny; Josep Dolz; Belén Marti- Cardona)
ANÁLISIS ESPECTRAL PRESIONES EN ALIVIADEROS DE VERTIDO LIBRE: APLICACIÓN AL FILTRADO DE MEDIDAS (<i>Luis G. Castillo, Antonio Vigueras-Rodríguez, José M. Carrillo</i>)
CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE REAIREACIÓN TURBULENTA. APLICACIÓN A LA MODELACIÓN DE FLUJOS EMULSIONADOS SOBRE ALIVIADEROS (<i>Daniel Valero, Rafael García</i>)68
EJECUCIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESALTOS HIDRÁULICOS EMULSIONADOS (<i>Omar</i> <i>Fullana, Daniel Valero, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Rafael García</i>)
PARALELIZACIÓN CUDA DEL MÉTODO SPH. APLICACIONES EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS (David López, Vicente Cuellar, Miguel de Blas, Rubén Díaz)
UN MODELO ACOPLADO EULERIANO-PFEM PARA LA SIMULACIÓN DE SOBREVERTIDO EN PRESAS DE ESCOLLERA. ENSAYO DE CALIBRACIÓN (Ángel Lara, Rafael Cobo)

LÍNEA PRIORITARIA A

CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE ESPACIOS FLUVIALES

Efecto de erosión local de traviesas transversales en encauzamientos

<u>David López</u>⁽¹⁾, Rubén Díaz⁽¹⁾, Alba González⁽¹⁾, Francisco J. E. Redondo⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Estudio Hidrográficos. CEDEX. david.lopez@cedex.es

(2) CH. Cantábrico.

El encauzamiento ha sido una herramienta empleada tradicionalmente por los ingenieros como medida de protección contra inundaciones. Transcurridos los años se ha comprobado que tales actuaciones pueden alterar el equilibrio hidromorfológico de los cauces, generando frecuentemente sedimentaciones que reducen la capacidad de drenaje del encauzamiento. Esto obliga a destinar una importante cantidad de recursos al dragado periódico de los tramos encauzados.

Hoy en día ha cambiado la forma de abordar los problemas de inundaciones. Se tiende a recuperar el espacio del río empleando el cauce de avenidas para su laminación. Esto ha motivado la retirada de motas en algunos tramos de nuestros ríos, como en el caso del río Órbigo, para mejorar la seguridad frente inundaciones.

Tristemente la construcción de encauzamientos en tramos urbanos genera una cierta sensación de seguridad que, junto con intereses económicos, han propiciado la extensión de los cascos urbanos en espacios que anteriormente pertenecían al río. Esto agrava los daños generados durante los episodios de avenida. En estos casos, cuando no son viables soluciones más respetuosas con el medio ambiente, la protección del casco urbano pasa por aumentar la capacidad del encauzamiento, modificando el ancho o el calado mediante elevación de cajeros o motas. El diseño de estas soluciones debe minimizar el desequilibrio sedimentológico del cauce.

La Confederación Hidrográfica del Cantábrico está estudiando la forma de estabilizar sedimentológicamente algunos tramos de ríos encauzados, por lo que ha suscrito un convenio con el CEDEX.

El río Caudal se encuentra encauzado desde la confluencia de los ríos Aller y Lena hasta aguas abajo de Mieres. Se trata de un río de gravas con un D_{50} de 62 mm y D_{90} 182 mm. Con este encauzamiento se realizó un ligero

ensanchamiento de sección de 49 a 55 m. Tras más de 20 años desde su construcción no ha sido necesario realizar ninguna actuación de dragado o de mantenimiento, a diferencia de otros encauzamientos realizados en la Confederación del Cantábrico. La figura 1 muestra una vista panorámica de Mieres en la que se puede apreciar como el cauce del río Caudal está jalonado por una serie de riostras transversales espaciadas entre 100 y 150 m. Estas estructuras escalonan el cauce manteniendo la pendiente media de 6 milésimas.



Figura 1. Vista panorámica de Mieres y del encauzamiento del río caudal.

Las riostras transversales son una solución que se emplea tradicionalmente para estabilizar la pendiente en un tramo con problemas de erosión. Sin embargo, en el caso de Mieres en que cabría esperar problemas de sedimentación, estas riostras se dispusieron con motivos estéticos para conseguir un espejo de agua uniforme. Se analiza la posibilidad de que precisamente estas riostras ayuden a estabilizar sedimentológicamente el tramo. Es posible que la turbulencia local al pie de estos saltos ayude a poner en suspensión el material de fondo, ayudando al comienzo de arrastre y que por este mecanismo se compense la tendencia a la sedimentación por efecto del ensanchamiento.

Se ha diseñado un experimento en Laboratorio, consistente en un modelo físico de lecho móvil en semejanza de Froude a escala 1:31, en un canal de pendiente 6 milésimas. El material del lecho del modelo físico tiene un D_{50} de 2 mm. El canal se alimenta con una tolva automática. Para aforar el arrastre se ha dispuesto a la salida del modelo una trampa de sedimentos para la

retención del árido arrastrado instrumentada con una célula de carga que permite el registro continuo.



Figura 2. Sistema de aforo sedimentológico en el modelo físico.

Se encuentran en marcha los ensayos para calibrar el arrastre de fondo sin riostras, en condiciones homólogas a las correspondientes al caudal conformador del tramo. En una segunda fase se dispondrán las riostras para comprobar su influencia en el arrastre de fondo.

Referencias.

Ikeda S., Parker, G. Kimura (1988) Stable width and depth of straight gravel rivers with heterogeneous bed material. Water Resource. Res 24(5) 713-722.

López, D. et. Al. (2011) Calibración sedimentológica del modelo físico del Meandro de Quinzanas. Seminario RLHE.

COMPARATIVA DEL FLUJO DE AGUA CLARA Y CON SEDIMENTOS A TRAVÉS DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO UTILIZANDO DATOS DE LABORATORIO Y MODELACIÓN NUMÉRICA CFD

Luis G. Castillo, Juan T. García, José M. Carrillo

Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT. jose.carrillo@upct.es

Los sistemas de captación de fondo consisten en una serie de rejas situadas en el lecho del cauce con la intención de que el agua sea captada una vez penetre a través de las mismas. Estas estructuras son utilizadas en ríos de montaña con fuertes pendientes y lechos irregulares en los que se encuentra un importante transporte de sedimentos y caudales de avenida. Las rejas se diseñan para captar la mayor cantidad de agua posible a la vez que deben retener la menor cantidad de sólidos. Así, un objetivo de los estudios que se está llevando a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) es optimizar este tipo de sistemas de captación para utilizarlos en flujos torrenciales y discontinuos con una alta concentración de sedimentos.

La metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que se basa en una solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds (RANS), junto con modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, simulan la interacción entre diferentes fluidos, como los flujos bifásicos agua-sedimento que aparecen en los sistemas de captación de fondo.

Se han comparado los resultados del flujo obtenidos con agua clara y con sedimentos a través de una reja de fondo utilizando algunos resultados de laboratorio y una metodología CFD.

En el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena se dispone de una infraestructura de un sistema de captación de fondo, consistente en un canal de 5 metros de longitud y 0,50 m de ancho, en el que se coloca, al final, una reja que puede adoptar diferentes pendientes. Además, tiene un canal de recogida del caudal captado por la reja y de una arqueta de

derivación que recoge el agua no captada. La entrada de caudal se mide mediante un caudalímetro electromagnético y los caudales no captados por la reja, se miden mediante un vertedero triangular. Las rejas fueron construidas de aluminio con sección transversal en *T*, de longitud 0,90 m y que se colocan al fondo del canal disponiéndose de tres configuraciones que se diferencian en el espaciamiento y espesor de las barras, existiendo diferentes índice de huecos o porosidad (*m*=0,16, 0,22 y 0,28). Los caudales específicos analizados son 53,8; 77,0; 114,6; 155,4 l/s.m.

En este estudio se han medido tanto el perfil adoptado por la lámina de agua como los caudales captados y no captados por la reja, tanto a nivel total como por unida de longitud de reja. Estos valores, junto con los obtenidos en un ensayo de laboratorio de iguales características llevado a cabo por *Noseda (1956)*, son utilizados para validar un modelo CFD.

Una vez validado el modelo con agua clara, se realizan una serie de modelaciones con sedimentos, en base a ciertos valores experimentales existentes. Se han desarrollado varios casos de modelación:

Caso 1. Para una reja de longitud *L*=0,50 m y espaciamiento entre barras de b_1 = 5,70 mm y porosidad *m*=0,16, de igual configuración a la usada por *Noseda* (1956). Los diámetros característicos de los materiales utilizados para la simulación son arenas de d_{50} =5 mm, limos de d_{50} =1x10⁻² mm, y una mezcla de ambos materiales en la misma proporción. Al principio de la reja se han simulado diferentes concentraciones de sedimentos entre 1 y 10%. La Fig. 1 muestra los resultados donde se observa que con una concentración de sedimentos del 10%, el caudal derivado (105,40 l/s/m) se reduce casi al 50% con respecto al flujo que se derivaría con agua clara (198,30 l/s/m).

Caso 2. Para la reja adoptada por *Drobir (1999)* de pendiente 20%, de barras circulares de 0,10 m de diámetro y 0,15 m de espaciamiento, m=0,6. A partir de los estudios recogidos por *Drobir (1981)* se escogió una arena de diámetro equivalente d_{95} =60 mm, para concentraciones en volumen de sedimentos en el flujo de aproximación de entre el 1 y 5%. Dado el amplio espaciamiento de dicha reja se llevó a cabo la modelación también para los espaciamientos de 0,06 y 0,03 m, con m=0,375 y m=0,23 respectivamente. Del mismo modo se llevaron a cabo los cálculos para régimen de aproximación de flujo subcrítico y supercrítico. *Drobir (1999)* distingue dos longitudes de captación: L_1 , medida en el hueco entre dos rejas, y que coincide con la distancia, en proyección horizontal, desde el inicio de la reja hasta el punto donde la superficie de la

lámina de agua cruza el eje de la reja; y L_2 , medida sobre barra, máxima distancia en proyección horizontal que se encuentra mojada.



Figura 1. Capacidad de derivación del sistema de captación, *q_d*, considerando diferentes concentraciones de sedimentos, *b₁*=5,70 mm, *m*=0,16, =0,50 m.



Figura 2. Longitudes de reja mojada (L_1 y L_2), en proyección horizontal para una reja de pendiente 20%, y un índice de huecos *m*=0,375, considerando distintos caudales específicos y regímenes de aproximación (1,00; 1,24; y 1,36 m³/s/m) y distintas concentraciones sólidas en volumen (1,00; 2,50; y 5,00 %).

DIMENSIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE PILAS SIMPLES CON MANTOS DE ESCOLLERA SUPERFICIALES EN CONDICIONES DE "*LECHO VIVO*"

Álvaro Galán, Gema Sánchez, Javier González

E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos (UCLM). alvaro.galan@uclm.es

Los procesos de erosión local en ambientes fluviales cobran una importancia fundamental cuando se trata, por ejemplo, de analizar la estabilidad de un puente con pilas dentro de la zona afectada por el flujo, ya que en la mayoría de casos de fallo, los efectos de la erosión local en la cimentación cobran una influencia considerable (Hamill, 1999).

Atendiendo al transporte sólido, podemos distinguir: *"condiciones de aguas claras"* si no existe movimiento generalizado del lecho, y *"condiciones de lecho vivo"* cuando existe transporte generalizado de sedimentos. En condiciones de lecho vivo es cuando surgen las formas de fondo, y con ello, la complicación a la hora de dimensionar protecciones superficiales con mantos de escollera, método más extendido por razones constructivas y económicas.

Los mecanismos principales de fallo en mantos de escollera (Chiew, 1995) son: a) fallo por cortante (se evita diseñando la protección con un tamaño de grano adecuado para evitar el arrastre), b) fallo por sifonamiento (uso de filtros o geotextiles para evitar la pérdida de material fino y hundimiento del manto), c) fallo de borde (se diseñan protecciones extensas para evitar que la caída de las piedras exteriores afecte a la seguridad de la estructura) y por último d) fallo por formas de fondo, que se produce por el avance de dunas y antidunas al pasar por la zona donde la protección está situada. Para evitar este último mecanismo de fallo habitualmente se entierra la protección hasta una profundidad mayor que la amplitud de las formas de fondo esperadas, complicando la ejecución y encareciendo su puesta en obra.

En este trabajo se realiza el estudio experimental para el dimensionamiento de mantos de escollera en superficie evitando el fallo por formas de fondo en condiciones de lecho vivo.

Empleando análisis dimensional podemos escribir el problema de la forma:

$$rac{w}{d}=\psi\left(I\equivrac{u}{u_c},rac{\Lambda}{h},rac{h}{d}
ight)$$

donde *w* es la dimensión de la protección (definida en la Figura 1), *d* es el diámetro de la pila, *l* es el parámetro de intensidad de flujo relacionado con la velocidad, *u*, y la velocidad crítica de inicio del movimiento, u_c , *h* es el calado y Λ es la amplitud de las formas de fondo.



Figura 1. Definición de las dimensiones de la protección.

La Figura 2 muestra esquemáticamente el canal de experimentación donde se ha llevado a cabo el estudio.



Figura 2. Vista esquemática del canal de experimentación: (1) Tanque de almacenamiento, (2) caudalímetro electromagnético, (3) elemento disipador, (4) dispensador de sedimentos, (5) zona de ensayo, (6) pila, (7) protección a ensayar, (8) trampa de sedimentos, (9) línea de recirculación de sedimentos, (10) compuerta abatible, (11) vertedero triangular, (12) línea de recirculación de agua.

Los primeros resultados experimentales para diferentes valores de los grupos adimensionales característicos del problema se muestran en la Figura 3. En este estudio se considera que se ha producido el fallo de la protección cuando alguna de las piedras en contacto con la pila (marcadas en diferente color) ha sido movida de su posición inicial.



Figura 3. Resultados experimentales obtenidos en función de los parámetros h/d e l. Arriba: en rojo ensayos donde la protección ha fallado, en verde ensayos donde la protección no ha fallado. Abajo: comparación para diferentes valores del parámetro h/d.

Bibliografía.

Chiew, Y.-M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers." Journal of Hydraulic Engineering, 121(9), 635-643.

Hamill, L. (1999). "Bridge Hydraulics". E&FN SPON, London and New York.

EROSIÓN LOCAL AGUAS ABAJO DE PUENTES CON SOLERA PROTEGIDA

Beatriz Nácher, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. beanacro@cam.upv.es

Las pilas y estribos de los puentes insertos en cauces provocan la contracción del flujo cuando éste pasa bajo la estructura, generando un aumento de velocidades. El flujo tiene mayor poder erosivo y se producen fenómenos de socavación que pueden desestabilizar y hacer colapsar la estructura.

Si el puente está protegido – se ha colocado un material más resistente que el del propio cauce en la solera bajo la estructura – el flujo no es capaz de erosionar esa zona, pero el problema de la erosión se traslada hacia aguas abajo. Las fosas de socavación que se han observado en casos reales de puentes con esta problemática tienen dimensiones suficientes para seguir afectando a la cimentación de la estructura.

El presente estudio pretende analizar cómo afectan al fenómeno erosivo dos aspectos del problema: el cambio de rigideces en el lecho entre el material del cauce y el material que constituye la protección, y la contracción del flujo a través de la estructura.

Para ello, se ha diseñado y llevado a cabo una campaña de ensayos de laboratorio en canal sedimentológico. En estos ensayos se representa, con placas de metacrilato, el estrechamiento que producirían los estribos de un puente exento y la zona de lecho protegida entre estribos. La variable de interés que se mide a lo largo de los ensayos es la profundidad máxima de socavación que se alcanza aguas abajo de la zona protegida (Figura 1).

Los ensayos se han diseñado en base a un análisis dimensional de las variables que influyen en el caso de estudio, simplificado para las condiciones que se dan en laboratorio. De este análisis se concluye que la profundidad máxima de socavación es función de tres variables: el número de Reynolds del flujo, el número de Froude y la relación de contracción. Los dos últimos se pueden controlar estableciendo las condiciones del flujo de aproximación necesarias y el ancho de las placas de metacrilato que representan los estribos del puente.



Figura 1. Fosa de socavación aguas abajo de la zona protegida.

Además de analizar la profundidad máxima de socavación, también se han tomado perfiles longitudinales completos de erosión-deposición (Figura 2), y se han comparado los mismos con un ensayo de referencia, en el que se ha eliminado la protección del lecho. En este ensayo, desaparece el efecto del cambio de rigideces, y la socavación se debe sólo a la contracción del flujo.



Figura 2. Comparación de perfiles longitudinales de erosión-deposición con y sin solera protegida.

Por último, también se han medido las profundidades máximas de socavación aguas arriba de la zona protegida, y se ha comparado cualitativamente la fosa de socavación en esta zona con la que se desarrolla aguas abajo. Los fenómenos erosivos predominantes son diferentes en cada caso, porque las fosas tienen características muy distintas: aguas arriba, el mecanismo erosivo es fundamentalmente el de socavación en estribos; aguas abajo, sin embargo, predomina la erosión por contracción y por cambio de rigideces.

En conclusión, la protección del lecho bajo la estructura modifica los mecanismos erosivos aguas abajo de la misma. Se producen fosas de socavación que se extienden a lo largo de longitudes considerables, con profundidades máximas nada despreciables.

Referencias.

Nácher Rodríguez, B.: Influencia de la contracción y de los cambios de rigidez del lecho en las condiciones críticas de inicio del movimiento aguas abajo de puentes sobre cauces. Tesina de Máster. Universitat Politècnica de Valencia (2012).<u>http://hdl.handle.net/10251/27858</u>.

SOCAVACIÓN EN GRUPOS DE PILAS DE PUENTE SOBRE CAUCES ALUVIALES

Pedro Millán, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. pedmilro@cam.upv.es

La erosión local (socavación) producida por la interacción cauce-puente durante las grandes avenidas es, junto con la pérdida de capacidad de desagüe por obstrucción, la entrada en carga, los empujes hidrodinámicos sobre la estructura y la inestabilidad del cauce, una de las causas más comunes de colapso de los puentes sobre cauces (Vallés, 2011).

El fenómeno de la socavación en pilas de puente, y en menor medida en estribos, ha suscitado el interés de los investigadores durante años. Asimismo, se están desarrollando nuevos métodos para el estudio de los fenómenos erosivos, como los modelos numéricos.

Aunque sobre socavación de pilas únicas se ha acumulado gran cantidad de conocimiento, respecto a la socavación en grupos de pilas las investigaciones han sido menos numerosas. Además, la mayoría de los trabajos estudian grupos de únicamente dos pilas. Sin embargo, son muchos los puentes sobre cauces sustentados por grupos de 2, 3, 4 y hasta 6 pilas alineadas en el sentido del flujo, y existen ejemplos cercanos de cómo este tipo de acción fluvial puede llegar a provocar el colapso de la estructura, con las consecuencias sociales y económicas que ello implica.

En este trabajo se analiza, experimentalmente, tanto la evolución del fenómeno de socavación alrededor de alineaciones de pilas cilíndricas múltiples como las máximas profundidades de socavación y posterior deposición. Como fruto de un análisis dimensional previo, el fenómeno se estudia desde el punto de vista de los principales factores intervinientes: número de pilas que compone el grupo (N), la separación entre ellas (S), su diámetro (D), las condiciones del flujo de aproximación (velocidad y calado aguas arriba) y las características del material del lecho (diámetro medio).

La campaña de ensayos se desarrolla en un canal sedimentológico de 2.5 m de longitud, sección rectangular, solera horizontal y ancho constante de 6.4 cm. Los cajeros de metacrilato permiten observar el flujo y los procesos erosivos. El

lecho móvil está constituido por una capa de arena de unos 6 cm de espesor. Esta arena presenta una granulometría cuasi-uniforme, con un diámetro máximo de 0.63 mm y mínimo de 0.40 mm. Un vertedero en pared delgada en el extremo de aguas abajo, regulable en altura, permite establecer diferentes condiciones de contorno.

Además del ensayo de pila única, que sirve como contraste en el análisis de resultados, se ensayan las una serie de configuraciones que resultan de combinar grupos de N=2, 3, 4 y 6 pilas con separaciones S=D, 2D, 3D, 4D, 5D y 6D.

En la figura 1 se sintetizan los resultados de profundidad máxima de socavación alcanzada en la primera pila del grupo $(Y_{s1,mas})$ adimensionalizada con la del caso de pila única (Y_{ss}) en función del parámetro adimensional S/D.



Figura 1. Separación entre pilas vs. máxima profundidad de socavación en pilas 1 y 2 adimensionalizada.

Como puede observarse todos los valores de la profundidad de socavación adimensionalizada superan la unidad, de lo que se concluye que en el caso de grupos de pilas, la primera pila está siempre más afectada que si estuviera sola, en todo el rango analizado de S/D. No obstante, el mismo análisis con las pilas sucesivas (en la figura 1 se observan los resultados de la pila 2) pone de manifiesto que la erosión que sufren respecto del caso de pila única mejora o empeora en función de S/D, es decir, de lo protegida o no que esté la pila por las demás pilas del grupo.

Referencias.

Vallés, F.J. (2011). Cuantificación de la vulnerabilidad de puentes sobre cauces frente a avenidas fluviales basada en inspecciones de campo: propuesta de una nueva metodología. UPV, Valencia.

LÍNEA PRIORITARIA B HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES

ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE DE RIBARROJA DE EBRO A PARTIR DE DATOS DE CAMPO

<u>Marina Arbat-Bofill</u>, Martí Sánchez-Juny, Ernest Bladé, Josep Dolz, Daniel Niñerola

Instituto FLUMEN UPC-CIMNE. marina.arbat@upc.edu

La Plataforma multiparamétrica Flumen (Figura 1.) medía las variables meteorológicas y de calidad del agua in situ; estuvo instalada en el embalse de Ribarroja de Ebro entre los años 2008-2010. La estructura consistía en una plataforma flotante (ver Figura 1. a) situada en el tramo final del embalse de Ribarroja de Ebro (a unos 300 m de la presa), se encontraba justo en medio del cauce, anclada mediante dos lastres en el fondo para impedir el giro. La plataforma constaba de dos partes claramente diferenciadas: en la parte flotante se encontraban los instrumentos meteorológicos para la toma de datos (cada 10 minutos); en el centro había un motor rotatorio que era el encargado de subir y bajar la sonda multiparamétrica para medidas de calidad del agua, de la marca AANDERAA (Figura 1b).

Las variables meteorológicas que se medían en la plataforma son: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación solar incidente, radiación solar reflejada, radiación solar neta y lluvia.

Las variables de calidad del agua medidas por la sonda multiparamétrica (Figura 1b) eran: velocidad y dirección del agua, temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto además de un sensor de presión. La sonda bajaba automáticamente cada 6 horas y paraba a tomar datos a varias profundidades (a 2, 4, 8, 12, 16 y 20 m de profundidad).

En mayo de 2009 se instaló una boya con una cadena de termistores a varias profundidades (Figura 1c). Se situó en medio del cauce de Ribarroja a la altura del embarcadero de Almatret, en el embalse de Ribarroja de Ebro. Constaba de un *Datalogger* modelo CR200 de la marca Campbell, con sensores de temperatura de la marca *Desin Instruments*, modelo PT-100 SR-NXH-1/10 DIN 3 hilos. La lectura de datos era cada 10 segundos, almacenándose la media cada 10 minutos. Los datos se recibían de forma remota a la Universidad mediante GSM, aquí se analizaban, depuraban i trataban. Finalmente se

almacenan en la base de datos del Ebro del Instituto de Investigación Flumen UPC.



Figura 1. a) Plataforma multiparamétrica Flumen; situada en el tramo final del embalse de Ribarroja de Ebro. b) Detalle de la sonda multiparamétrica ANDERAA. c) Boya Flumen instalada en Almatret.

Debido a los motivos citados y a la disponibilidad de datos y con tal de facilitar la comparación entre ambos años se decidió trabajar con el periodo comprendido entre los días 145 (25/05) y el 295 (22/10).

Con el estudio meteorológico e hidrodinámico se pone en evidencia la clara diferencia de comportamiento entre el año 2009 y el 2010: El año 2009 muy estable en cuanto a caudales y solo presenta un episodio de estratificación mientras que el año 2010 presentó un mayor número de picos de caudal (se destaca una avenida importante a finales de primavera), que rompió la termoclina provocando la mezcla del embalse. Se puede considerar que la estratificación es más acusada en 2010 que en 2009 puesto que hay mayor diferencia de temperaturas entre capas superficiales y profundas. En general se aprecia mayor estratificación en la zona de la boya que en la zona de la Plataforma Flumen debido a la mayor mezcla y a la transferencia de calor a lo largo de la gran masa de agua. En la plataforma se observan los mismos efectos de los picos de caudal que en la boya pero más suavizados.

En cuanto a la rotura de la termoclina en el año 2009 tuvo lugar aproximadamente en el día 255. Al haber una disminución importante de temperaturas del aire las capas superficiales se enfrían, por lo que el gradiente térmico en la columna de agua disminuye y una pequeña avenida procedente del Ebro hace que la estratificación se rompa. La rotura de la termoclina 2010 sigue el mismo patrón pero es alrededor del día 275.


Figura 2. Comparación de la temperatura del agua medida en la boya versus la temperatura del agua medida en la Plataforma Flumen (a unos 300 km aguas arriba de la presa de Ribarroja). a) Periodo de estudio 2009; b) Periodo de estudio 2010.

El tiempo de tránsito de los picos de caudal a grandes rasgos se puede observar que los picos del orden de 100 a 400 m³/s tardan de uno a dos días desde las entradas del embalse (salida de Mequinenza o entrada del río Segre) a la boya y uno o dos días más desde la boya a la plataforma Flumen.

LÍNEA PRIORITARIA C RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA

CRITERIOS DE PELIGROSIDAD ASOCIADOS A LA ESCORRENTÍA URBANA

Beniamino Russo⁽¹⁾, Manuel Gómez⁽²⁾, Francesco Macchione⁽³⁾

⁽¹⁾ Escuela Politécnica de La Almunia (Universidad de Zaragoza). brusso@unizar.es

⁽²⁾ Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya

⁽³⁾ Lampit, Università della Calabria

Hoy en día la seguridad de las personas en zonas inundables es motivo de gran preocupación en el diseño y la gestión de las infraestructuras asociadas a las aguas pluviales. En medio urbano, por ejemplo, la seguridad de actividades ciudadanas como el tráfico peatonal y vehicular durante un suceso de lluvia, y la no inundabilidad de viviendas o comercios, es el objetivo principal que guía el funcionamiento de un sistema de drenaje. Sucesos de lluvia extremos combinados con una insuficiente capacidad del sistema de drenaje pueden producir inundaciones de áreas urbanas y problemas asociados a la circulación vehicular y peatonal (aquaplaning, salpicaduras, peligro de arrastre y vuelco para peatones y vehículos, etc.).

En particular, en caso de inundaciones urbanas, la seguridad de las personas puede verse comprometida cuando éstas se exponen a flujos cuyas velocidades exceden su capacidad de permanecer de pie o atravesar una calle por la que circula el agua. En las últimas décadas se han llevado a cabo varios estudios experimentales y numéricos para definir los límites de la estabilidad humana dentro de diferentes regímenes de flujo. Actualmente existe un cierto acuerdo en la literatura sobre el hecho que la peligrosidad hidráulica (hazard) ligada a la escorrentía urbana sea básicamente asociada a los parámetros del flujo calado (y) y velocidad (y) y muchos autores han proporcionado, en el curso de los últimos años, algunas expresiones que evalúan el grado de peligrosidad del flujo en función de uno de estos parámetros o de la combinación de los dos (Abt et al., 1989; Reiter, 2000). En muchos de estos casos la peligrosidad del flujo se define como la condición necesaria para que ocurra un fenómeno de vuelco o deslizamiento del peatón por efecto del flujo. Muchos de estos estudios proponen expresiones que se refieren a flujos en cauces o llanuras de inundación por lo cual no son muy adecuadas para caracterizar la peligrosidad del flujo en calles cuando las inundaciones se producen por el efecto combinado de la escorrentía superficial y de los caudales excedentes del sistema de drenaje en carga (bajos calados y velocidades elevadas). Con el fin de hallar criterios de peligrosidad específicos para el medio urbano durante eventos de lluvia extremos, en el marco de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia Español, y apoyado por la Fundación Agbar, el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universitat Politécnica de Cataluña (UPC), se ha diseñado y construido una plataforma que simula con la máxima precisión posible, una sección de calle real (con aceras, bordillos, calzada con bombeo transversal, etc.).

Además, de acuerdo con el objetivo del proyecto, se han desarrollado una serie de ensayos para evaluar la estabilidad de los peatones de acuerdo con un determinado protocolo de ensayo. Según este protocolo, 23 sujetos de riesgo, con diferentes pesos y alturas, cruzaban la plataforma y circulaban en ella frente a varios caudales circulantes (de 100 a 500 l/s) y para diferentes pendientes longitudinales (hasta el 10%). En particular se analizaron las condiciones límites en las cuales los sujetos de riesgo manifestaban clara inestabilidad u ocurrían fenómenos de arrastre debido a la acción del flujo.



Figura 1. A la izquierda y al centro experiencias experimentales para simular el flujo en llanuras de inundación (Abt et al., 1989; ARMC, 2000). A la derecha imagen de la campaña experimental en plataforma UPC que simula una calle urbana.

Los resultados obtenidos sobre la base de 834 ensayos han demostrado que, para sujetos con un peso entre 50 y 60 Kg, velocidades del flujo en calles del orden de 1.5 - 2 m/s pueden resultar críticas en relación a su estabilidad. En particular se han evaluado las velocidades asociadas a condiciones de

peligrosidad alta, moderada y baja con relación al rango de calados alcanzados en laboratorio (Tabla 1).

Nivel de peligrosidad	Condiciones del flujo		
	(calados entre 9 y 16 cm)		
Alto	$v \ge 1.88 \text{ m/s}$		
Moderado	$1.5 \le v < 1.88 \text{ m/s}$		
Bajo	v < 1.51		

Tabla 1. Criterios de peligrosidad basados en velocidad del flujo para áreas urbanas.

Además, el producto $v \cdot v$ (velocidad por calado) asociado a condiciones de inestabilidad muchas veces ha resultado ser bastante menor del valor habitualmente utilizado en la bibliografía de 0.5 m²/s. Los parámetros de las condiciones del flujo asociados a condiciones de alta peligrosidad se han comparado con los criterios empleados en España para la clasificación de la alta peligrosidad en la "Guía Técnica de Clasificación de presas en función del v con riesao potencial" (MMA-DGOHCA, 1996) diferentes criterios internacionales (Shand et al., 2010). Ha quedado patente que todos los estudios analizados sobreestiman la capacidad de resistencia de un peatón frente a la acción hidrodinámica del flujo en medio urbano, por lo cual parecen poco adecuados a la hora de estimar la peligrosidad en calles durante episodios de lluvia extremos.



Figura. 2. A la izquierda, situaciones de peligrosidad hidráulica registrados durante la campaña experimental de la UPC representados en la gráfica propuesta por el MMA-DGOHCA (1996). A la derecha estudio comparativo de criterios de peligrosidad de ámbito internacional propuesto por Shand et al. (2010).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE TRANSFROMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA Y FLUJO EN UNA RED DE DRENAJE. PROYECTO MODUS

Ignacio Fraga, Luis Cea, Jerónimo Puertas

Grupo de Enxeñería da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA). Universidade de A Coruña. ignacio.fraga@udc.es

El estudio experimental presentado a continuación se enmarca dentro del proyecto MODUS (Modelo de drenaje Urbano Sostenible), financiado por la Xunta de Galicia. Este proyecto pretende desarrolla una herramienta informática que permita predecir zonas inundadas y cargas contaminantes de sólidos generadas en zonas urbanas durante sucesos extremos de precipitación, con el objetivo de aplicarla al diseño y análisis de sistemas de drenaje urbano sostenibles. El desarrollo y validación de este modelo se apoya en medidas experimentales, realizadas tanto en laboratorio como en campo.

Para este estudio experimental se construyó un segmento de calle a escala 1:1, de aproximadamente 6 x 6 metros, con firme y acera de hormigón. En ella se puede simular lluvia mediante una serie de difusores situados en unos bastidores sobre la calle, y escorrentía mediante el vertido por coronación de un pequeño depósito localizado en uno de los extremos de la calle. Este depósito se sitúa en el extremo superior de la misma, situándose en el inferior un canal que recoge el agua en la salida. También se disponen dos sumideros cuadrados de 30 cm de lado, situados a 1.75 y 5 metros respectivamente del contorno de entrada de escorrentía. Para la evacuación del agua recogida a través de los sumideros y el canal lateral se dispone de una red de drenaje, compuesta por tubos de PVC de diámetros 90 y 200 mm y diferentes pendientes. Al final de la red se sitúa un depósito en el que se recoge el agua evacuada y se determina el caudal en cada instante a partir de la variación del volumen.

El objetivo de los ensayos es determinar los caudales en los diferentes elementos de la red y los calados en la superficie de la calle, para validar un modelo numérico acoplado. El flujo en superficie se modeliza con las ecuaciones SWE 2D, mientras que para el flujo en la red de tuberías se emplea una simplificación 1D. Se realizaron ensayos tanto con lluvia y escorrentía de forma aislada, como ambas simultáneamente.



Figura 1. Esquema del montaje experimental y fotografía del mismo (superior derecha).

De forma previa a los ensayos, se realizó una batimetría de detalle de la cuenca. Para ello se cerraron los contornos de la misma y se taparon los sumideros. Tras ello se llenó de forma progresiva la cuenca con agua con colorante, fotografiando el frente seco-mojado a diferentes alturas. Las fotografías obtenidas se geo-referenciaron, determinando así las coordenadas de las curvas de nivel correspondientes a las distintas alturas.

Uno de los aspectos más innovadores de esta campaña experimental es la medida de caudales que circulan en la propia red. Para determinar el caudal en cada instante se disponen UDV (Ultrasound Doppler Velocimeter) bajo cada tubería, que emiten ultrasonidos con una frecuencia establecida. La comparación de la onda emitida con la reflejada permite determinar el perfil de velocidades en diferentes volúmenes de control así como la posición de la lámina libre. A partir del perfil obtenido y la geometría de la tubería se integra el caudal en cada instante. Se trata de una técnica no intrusiva y sin ninguna afección a las condiciones hidrodinámicas dentro de las conducciones, siendo



necesario únicamente un soporte adherido al exterior de la tubería en el que se sitúa la propia sonda.

Figura 2. Esquema de medida del UDV y ejemplo de perfil de velocidades obtenido.

La medida mediante UDV necesita una calibración previa para determinar con precisión el ángulo de medida y la posición de la interfaz tubería-agua, fijando así el origen para los calados. Esta calibración se realiza haciendo circular por cada tubería de la red una serie de caudales definidos y comparando los resultados con diferentes con distintos valores de ángulo y distancia a origen.

La medida de los calados en la superficie se realiza en diferentes puntos, suficientemente alejados de elementos como sumideros o los bordes de la calle, mediante sondas de ultrasonidos. Estas sondas determinan el calado en cada instante con una frecuencia configurable.

PREVENCIÓN Y ELIMINACIÓN DE OLORES EN REDES DE SANEAMIENTO MEDIANTE INYECCIÓN DE AIRE EN IMPULSIONES

Juan T. García, Luis G. Castillo

Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT. juan.gbermejo@upct.es

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un gas que genera malos olores, siendo además corrosivo y nocivo. En las conducciones de impulsión de aguas residuales, la falta de oxígeno facilita la generación de importantes concentraciones de sulfuros (HS) y ácido sulfhídrico (H_2S), provocando que en dichos puntos las concentraciones medidas de ácido sulfhídrico se acerquen a los 200 ppm, superando así los máximos permitidos para el contacto con el ser humano.

La inyección directa de aire comprimido en las tuberías de impulsión controla la generación de sulfuros (*Tanaka et al, 1995*) y además se ha comprobado que el aire a presión en las tuberías de impulsión mejora la difusión de oxígeno disuelto en el agua residual (*Takatoshi Ochi et al, 1998*). Dicha inyección, además de conseguir el objetivo de mantener unas condiciones aerobias dentro de la tubería de impulsión, también provoca la oxidación de los sulfuros ya presentes en el agua residual devolviéndolos a compuestos de oxidación intermedia (tiosulfatos, sulfitos, etc.) o sulfatos, eliminando así la liberación de malos olores.

Se presenta los principales resultados de diversas pruebas basadas en la introducción de aire comprimido al flujo de agua residual de una serie de tuberías de impulsión pertenecientes a Estaciones de Bombeo en la zona costera del Mar Menor del Término municipal de Cartagena (EBAR de Playa Honda IA, IB; EBAR de Playa Paraíso, y EBAR de Mar de Cristal), con diversos diámetros, longitudes, caudales, desniveles geométricos y siempre con pendiente ascendente constante, sin puntos intermedios bajos o altos.

En las figuras 1 y 2 se muestran los resultados favorables en cuanto a la prevención de la formación de sulfuros o ácido sulfhídrico en el agua residual y los niveles de oxígeno disuelto alcanzados en función de las características de cada impulsión. Desde el punto de vista hidráulico se establece un flujo bifásico agua residual - aire, en el que se han medido los transitorios provocados por

paradas de bombas, resultando éstos, en todos los casos, de amplitud menor a la de los transitorios medidos sin la inyección de aire (ver figura 3).

Punto de actua- ción	Long. Cond. (m)	Desnivel geométrico (m)	Diámetro tubería (mm)	Potencia inyección (kW/h)	Caudal aire má- ximo de inyección (m ³ /h)	Caudal agua residual (m ³ /h)
Mar de Cristal	1600	15	350	5,5	54,7	547
Playa Hon- da IA	660	10	900	11	103,5	1035
Playa Hon- da IB	660	10	550	7,5	56,6	566
Playa Pa- raíso	1043	12	350	2,2	16,7	167

Tabla nº 1. Características de las impulsiones analizadas y de la inyección de aire.



Figura 1.Evolución temporal de concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico sin inyección de aire.



Figura 2. Evolución temporal concentración de oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico con inyección de aire.



Figura 3. Representación de presiones en la tubería de impulsión, en continuo, con arranques y paros de las bombas, paraloso los casos con inyección y sin inyección de aire.

LÍNEA PRIORITARIA D

SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Ensayos de detección de peces para escalas de hendidura vertical utilizando escáner láser 2D

Juan R. Rabuñal ⁽¹⁾, Daniel Villares ⁽¹⁾, <u>Álvaro Rodríguez</u> ⁽²⁾, Ángel Rico ⁽²⁾, Luis Pena ⁽³⁾, Jerónimo Puertas ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC)

⁽²⁾ Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidade da Coruña. arodriguezta@udc.es

⁽³⁾ Dpto. de Ingeniería Hidráulica, Universidade da Coruña

El diseño de una escala vertical depende de la interacción de parámetros hidráulicos y biológicos, ya que las variables hidrodinámicas de la piscina (como la velocidad del agua) deben ser adecuadas a los requisitos de los peces.

Con una serie de experimentos se intenta detectar objetos en movimiento, dentro del agua, y la distancia a la que se encuentran, utilizando para ello un sensor láser Hokuyo URG-04LX-UG01. Este sensor tiene como características principales una longitud de onda de 785nm y su área de escaneado es un semicírculo de 240° con radio máximo de 4000mm. Un primer experimento se utiliza para calcular la distancia que alcanza el láser para detectar un objeto en diferentes condiciones de turbidez de agua y su error en el cálculo. Para realizar este experimento se construye un cilindro de metacrilato donde proteger el sensor una vez metido en el agua. Este metacrilato provoca una reducción del alcance del láser a la que hay que sumar también la reducción producida por el efecto de estar introducido en agua.

Se utiliza un recipiente de cristal con 93 litros de agua, a la que se le irá añadiendo en sucesivas fases limo de sílice para enturbiar el agua. Se realizan cuatro mediciones en diferentes condiciones. Con 0,67 NTU de turbidez se alcanzan medidas correctas de hasta 30 cm con coeficiente de correlación de 0,9986 y de 0,9389 en medidas hasta 50 cm. Con 8 gr de limo de sílice (18,84 NTU de turbidez) se alcanzan los 20 cm con una correlación de 0,9952. Con 16 gr de limo de sílice (39,56 NTU de turbidez) se alcanza los 20 cm y con 24 gr



de limo de sílice (59 NTU de turbidez) se obtienen medidas correctas hasta los 15 cm con 0,9993 de correlación.

Figura 1. Medidas con agua limpia (0,67 NTU de turbidez).

En un segundo experimento se va a comprobar la detección de objetos en movimiento en agua. Para ello se coloca el sensor láser en el exterior de una piscina con motor que hace circular el agua en circuito cerrado. Se introduce un objeto en el agua simulando el movimiento que se podría producir en condiciones naturales y se desarrolla una aplicación informática que detecta el objeto y lo dibuja en pantalla utilizando una escala de grises. Cuanto más oscura es la imagen indica una distancia menor al sensor, mientras que se irá aclarando según el objeto se va alejando. En las siguientes figuras se pueden observar una serie de capturas del programa en ejecución donde se observa la detección del pez.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación, Desenvolvemento e Innovación de la Xunta de Galicia (Ref. 10MDS014CT) y

por el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688). También agradecer al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) su colaboración en los mencionados proyectos.



Figura 2. Capturas de la aplicación en diferentes medidas.

INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE ESCALA EN LA SIMULACION NUMÉRICA DE ALIVIADEROS DE VERTIDO LIBRE

Luis G. Castillo, José M. Carrillo

Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hidr@m. jose.carrillo@upct.es

Una consecuencia del cambio climático es el incremento y frecuencia de las avenidas, lo que condiciona la capacidad de los órganos de desagüe. Una alternativa de solución sería analizar el desbordamiento por coronación durante dichos eventos extremos.

Se han realizado diferentes estudios del funcionamiento de las infraestructuras en caso de desbordamiento con el objetivo de reforzar adecuadamente las presas existente y evitar su destrucción (Annandale, 2006; Wahl et al., 2008).

En el reintegro de los caudales por desbordamiento, la disipación de energía se produce principalmente por aireación y fenómenos de alta turbulencia que complican la caracterización del flujo bifásico aire-agua.

Teniendo en cuenta esta problemática, y partiendo de los distintos resultados experimentales existentes, se están llevando a cabo trabajos de investigación en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Se analizan velocidades y tasas de aireación en distintas secciones del chorro vertiente, así como velocidades, tasas de aireación y distribución de presiones en el cuenco de amortiguación.

En un estudio de modelo reducido se consideran que el modelo a escala y el sistema real o prototipo, presentan comportamientos semejantes respecto a determinados fenómenos. Con ciertas limitaciones, las medidas efectuadas sobre algunas magnitudes físicas en el modelo permiten anticipar el comportamiento del sistema real mediante "extrapolación modelo-prototipo".

No es posible obtener semejanza total entre modelo y prototipo, por lo que deben emplearse semejanzas parciales en las que se reproduzcan adecuadamente las fuerzas dominantes, admitiendo una cierta desviación de las secundarias. En fenómenos de flujo relacionados con presas predominan las fuerzas gravitatorias o similitud de Froude.



Figura 1. Infraestructura para el estudio de chorros de vertido libre.

Los programas de dinámica de fluidos computacional (CFD) resuelven la interacción entre los diferentes fluidos, tales como flujos bifásicos aire-agua. Previa comprobación y validación, constituyen una nueva y potente herramienta que sirve de complemento para la comprensión de los modelos físicos y/o prototipos.

Existen diversos estudios de aliviaderos con CFD con muy buenos resultados, en los cuales se han utilizado diferentes modelos de turbulencia de viscosidad de remolino. Sin embargo, el estudio de desbordamiento de presas y el impacto de chorros en un cuenco de disipación no ha sido suficientemente abordado (Ho y Riddette, 2010).

En este estudio, se han llevado a cabo simulaciones numéricas usando diferentes relaciones de escala del dispositivo de laboratorio de la UPCT, cumpliendo la ley de semejanza de Froude (1:1; 1:10; 1:20 y 1:40).

Los resultados de las simulaciones numéricas se comparan con la Metodología Paramétrica propuesta por Castillo (2006, 2007) y Castillo y Carrillo (2012), así como también con nuevas medidas de laboratorio.



Figura 2. Distancia horizontal al punto de estancamiento X_{imp} y velocidad del chorro incidente V_j para distintos factores de escala.

Referencias.

Annandale, G. W. (2006). Scour technology. Mechanism and engineering practice. McGraw Hill.

Ho, D. K.H., & Riddette, K. M. (2010). Application of computational fluid dynamics to evaluate hydraulic performance of spillways in Australia. Australian Journal of Civil Engineering, 6(1), 81-104.

Castillo, L. (2006). Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools. The 7th International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE-2006), IAHR, ASCE. Philadelphia, USA: Drexel University. College of Engineering. DSpace Digital Lybrary. DU Haggerty Library.

Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2012). Hydrodynamics characterization in plunge pools. Simulation with CFD methodology and validation with experimental measurements. 2nd IAHR European Congress. Múnich, Germany.

Wahl, T. L., Frizell, K. H., & Cohen, E. A. (2008). Computing the Trajectory of Free Jets. Journal of Hydraulic Engineering , 134 (2), 256-260.

Distribución lateral del caudal específico en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales: resultados del proyecto ALIVESCA

Soledad Estrella; Martí Sánchez-Juny; Josep Dolz; Belén Marti-Cardona

Instituto de Investigación Flumen UPC-CIMNE. soledad.estrella@upc.edu

En la construcción tradicional de aliviaderos escalonados se diseñan unos cajeros laterales que guían el flujo de agua desde la coronación hasta el pie del aliviadero. Dichos cajeros son construidos con encofrados trepantes específicos, utilizando hormigón vibrado para su construcción y suponen una unidad de obra de costes y tiempos de ejecución significativos.

El proyecto ALIVESCA ha tenido como objetivo estudiar el comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales mediante el estudio en modelo reducido. Para ello ha sido de principal interés cuantificar la expansión lateral del flujo, determinando la variación del caudal específico a lo largo y a lo ancho del vertido, en función del caudal específico de entrada y la altura del aliviadero.

Descripción cualitativa de la expansión lateral de la lámina de agua.

Teniendo en cuenta que todo el ancho de la presa sería útil para el paso de agua, la ausencia de cajeros laterales produce una expansión lateral de la lámina de agua y por tanto una disminución del caudal específico a lo largo y ancho de la rápida escalonada.

La Fig. 1 ilustra este comportamiento, se trata de una vista posterior del modelo donde se puede apreciar como la expansión lateral del flujo influye transversalmente en el llenado de los escalones. Claramente se observa que a determinada altura, en la zona encarada con la apertura del vertido el caudal circulante es mayor que en la zona más alejada hacia la izquierda. El ejemplo mostrado corresponde a un ancho de vertido en prototipo $b_0/B=1/3$ y un caudal específico en prototipo al inicio del vertido $q_e=15 \text{ m}^3/\text{s/m}.$



Figura 1. Vista posterior de la expansión lateral respecto al llenado de los escalones. Ensayo b_0 =15 m y q_e=15 m³/s/m.

Metodología propuesta.

El modelo reducido ubicado en los laboratorios del Instituto Flumen opera bajo la semejanza de Froude. Se ha construido a escala 1:15 y representa un aliviadero prototipo de altura de presa (H) de 75 m, altura de escalón (h) de 1.20 m, pendiente (i) 0.8 y un ancho de paramento (B) de 45 m.

Partiendo de la descripción cualitativa se determinó que las variables que condicionan la expansión lateral son: el caudal específico a la entrada y la posición (altura) considerada. La distribución lateral del caudal específico se ha obtenido por combinación de medidas de aforo e información proveniente de imágenes.

La distribución de caudal por aforos se realizó utilizando tres canales uniformemente repartidos a lo ancho del pie del aliviadero, esto es una longitud de B/3 al pie de la rápida. La Fig. 2 ilustra la disposición de los canales a pie de presa y la Fig. 3 muestra el recrecimiento de los canales para obtener el aforo a diferentes alturas de aliviadero.

El análisis de imágenes sirvió para obtener la distribución transversal de caudal correlacionando la información de imagen con la medida puntual de aforos. Referencias a aplicación del análisis de imagen pueden encontrarse en Sánchez-Juny y Dolz (2005), Martí-Cardona et al. (2010) y Ruiz-Villanueva et al. (2011).

El método utilizado consiste en la obtención de videos frontales de cada ensavo recogiendo un mínimo de 240 fotogramas por ensavo a una frecuencia de30 fps. Utilizando un código de Matlab, la información de los 240 fotogramas se resume en una imagen promedio. La distribución de caudales por aforo se correlaciona entonces con las intensidades promediadas en los píxeles correspondientes (Fig. 4).



Figura 2. Canales para aforo a pie de presa en el modelo ALIVESCA



Figura 3. Extensión de los canales para aforar diferentes alturas



Fotograma 1

Fotograma 2

Fotograma n

Imagen promedio



El resultado es un método propuesto para relacionar el dato de aforos con la información de series de imágenes imponiendo la ecuación de conservación de la masa, y de esta manera obtener la distribución del caudal a lo ancho en función del caudal específico a la entrada y de la posición (altura) considerada.

Referencias bibliográficas.

Martí-Cardona, B., Lopez-Martinez, C., Dolz, J., and Bladé, E. (2010). "ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring." Remote Sensing of Environment, 114 2802-2815.

Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Bodoque del Pozo, J. M., and Díez-Herrero, A. (2011). "Woody debris transport during floods: 2D hydrodynamic modelling approach." 31.

Sánchez-Juny, M., and Dolz, J. (2005). "Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: Qualitative analysis and pressure measurements." Journal of Hydraulic Research-IAHR, 43(5), 540-548.

ANÁLISIS ESPECTRAL PRESIONES EN ALIVIADEROS DE VERTIDO LIBRE: APLICACIÓN AL FILTRADO DE MEDIDAS

Luis G. Castillo, Antonio Vigueras-Rodríguez, José M. Carrillo

Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de l+D+i Hidr@m. luis.castillo@upct.es

El vertido libre por coronación constituye la primera opción de diseño para desaguar los caudales de avenida en las presas bóveda. Sin embargo, el incremento de la frecuencia e intensidad de las avenidas debido al cambio climático, ha llevado a analizar la posibilidad del desbordamiento por coronación en las presas de fábrica en general.

Diversos autores han contribuido al análisis de las presiones debidas a los chorros turbulentos que inciden en la solera del cuenco de disipación de energía. Entre ellos, cabe destacar los trabajos teóricos y experimentales de Ervine et al. (1997), Castillo (1989, 2006, 2007), Puertas (1994), Bollaert y Schleiss (2003), así como los estudios numéricos a partir de herramientas CFD de Castillo y Carrillo (2011, 2012).

El fenómeno analizado es de gran complejidad dado que la disipación de energía se obtiene como resultado de la alta turbulencia del chorro y de la aireación en la caída, pudiendo llegar a alcanzarse la rotura del chorro. Para avanzar en el conocimiento del fenómeno físico es imprescindible contar con una buena base de datos experimental de medidas de presión, campos de velocidad, tasas de aireación, etc. adquiridas en modelos físicos. Estos datos sirven de base para la calibración y validación de las herramientas numéricas.

A tal efecto, en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica se está empleando una infraestructura diseñada para el estudio de chorros turbulentos. En la solera del cuenco de disipación de energía se dispone de una serie de sensores piezorresistivos. A partir de estos sensores, se obtienen registros de presiones instantáneas, considerando una frecuencia de muestreo de 20 Hz (figura 1).



Figura 1. Esquema de la infraestructura para el estudio de chorros de vertido libre.

Debido a fenómenos de aireación, turbulencia y recirculación dentro del cuenco, la posición de la zona de impacto del chorro tiene ciertas oscilaciones, cuya amplitud tiende a crecer con la altura de caída del chorro. A partir de una determinada altura, y para colchones de amortiguación reducidos, estas oscilaciones pueden conducir a que el chorro no incida directamente sobre el transductor de presión, produciéndose de esta forma que las presiones registradas en esos intervalos de tiempo, no se correspondan con el valor real de las mismas.

Para conseguir acotar este efecto es necesario implementar un método de filtrado capaz de adecuarse a los datos procedentes de distintas instalaciones. Considerando que el comportamiento dinámico de la presión cambia sustancialmente al registrar muestras fuera de la zona de impacto del chorro, se ha optado por construir un filtro no convencional basado en el análisis espectral en el dominio de la frecuencia-tiempo. Para ello, se ha realizado un análisis espectral de las señales medidas basado en la transformada rápida de Fourier (FFT).

Adicionalmente, se han considerado otras herramientas como la transformada de Fourier de tiempo reducido (STFT) o la transformada Wavelet. Estas transformadas permiten generar un espectro de frecuencia reflejado en el dominio del tiempo y, por lo tanto, permite detectar cambios significativos en la distribución espectral de la presión fluctuante, distinguiendo los períodos en los que la incidencia del chorro no es directa.

En las figuras 2a y 2b se muestran los primeros 15 segundos de los registros de presión medidos para caudales de q = 0.058 y 0.069 m²/s, bajo condiciones de impacto directo. En el primer caso se aprecian algunos picos singulares, mientras que en la fig. 2b se observan zonas de presión significativamente inferior causadas por la fenomenología descrita anteriormente.

La parte inferior de la figura 2 muestra la correspondiente parte real de la transformada Wavelet de las señales anteriores, basada en la función de Morlet. En este tramo del registro se puede considerar que las zonas donde la presión se reduce debido a que el impacto sobre el transductor no es directo puede detectarse como un aumento de las componentes fluctuantes de frecuencias en torno a los 0.25 Hz.



Figura 2. Registros de presión y parte real de la transformada Wavelet: a) q = $0.058 \text{ m}^2/\text{s}$ e impacto directo, b) q = $0.069 \text{ m}^2/\text{s}$ e impacto directo.

CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE REAIREACIÓN TURBULENTA. APLICACIÓN A LA MODELACIÓN DE FLUJOS EMULSIONADOS SOBRE ALIVIADEROS

Daniel Valero, Rafael García

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. davahue@cam.upv.es

En el flujo sobre la superficie de un aliviadero existe una zona de agua clara donde la capa límite, que arranca desde el vértice del aliviadero, crece hasta cortar la superficie libre. Cuando esto sucede la turbulencia de la capa límite puede iniciar una reaireación natural del filete fluido.



Figura 1. Emulsionamiento del flujo sobre la superficie de un aliviadero.

De este modo, en la dinámica de fluidos computacional (CFD) el efecto de esta capa límite frecuentemente queda modelado mediante el uso de modelos de turbulencia tipo RANS, siendo así muy frecuente usar modelos de dos ecuaciones como el ampliamente utilizado κ - ϵ . En este modelo, la magnitud κ es la energía cinética turbulenta y ϵ su disipación.

En nuestro modelo de reaireación turbulenta, se realiza un balance entre las fuerzas perturbadoras (turbulencia) y las estabilizadoras (gravedad y tensión superficial). De este modo, cuando las fuerzas perturbadoras superan las

estabilizadoras, cierto volumen de aire es atrapado y pasa a ser transportado por el flujo, cambiando la densidad macroscópica del volumen fluido y dando lugar a una turbulencia inducida por el arrastre de las burbujas y el gradiente de densidades.

Se ha observado durante las simulaciones una dependencia respecto al tamaño de celda. Por lo tanto, la calibración se ha realizado por separado para distintos tamaños de celda. Así, se han calibrado dos coeficientes: el primero afectando directamente al porcentaje de aire atrapado una vez se produce la reaireación, y el segundo a modo de coeficiente de calibración multiplicando la tensión superficial.

Se han medido dos errores: la concentración media en el flujo completamente desarrollado sobre la rápida y la distancia hasta el punto crítico de reaireación. Los parámetros se han calibrado de modo que den un error nulo en la concentración media y al mismo tiempo minimicen el error en la distancia al punto crítico.



Figura 2. Calibración de los parámetros del modelo en función del tamaño de celda a) mediante el uso de un coeficiente de calibración para la tensión superficial y b) sin usar coeficiente de calibración para la tensión superficial.

Este estudio ha revelado que para mallados burdos el coeficiente de calibración para la tensión superficial ayuda significantemente a conseguir la concentración media en la rápida reduciendo el error en la determinación del punto crítico. Sin embargo, con mallados finos el coeficiente de calibración de la tensión superficial no añade ninguna ventaja y toma un valor unitario. Cuando el mallado es excesivamente fino, el modelo no es capaz de recoger con
precisión la concentración media en la rápida aunque sí que recoge mejor la forma del perfil de concentraciones.

Agradecimientos.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "El uso de la aireación forzada del flujo en rápidas como extensión del campo de utilización de las obras de disipación de energía a pie de presa mediante resalto hidráulico" (BIA2011-28756-C03-01), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la Unión Europea.

EJECUCIÓN DE UN NUEVO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESALTOS HIDRÁULICOS EMULSIONADOS

<u>Omar Fullana</u>, Daniel Valero, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Rafael García

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. omfulmon@cam.upv.es

En los estudios para aumentar la capacidad de desagüe de los aliviaderos de las presas de gravedad, la parte más comprometida y compleja desde el punto de vista técnico es la relativa a la obra de disipación de energía, normalmente el cuenco amortiguador del resalto. Con el objetivo de poder aumentar esta capacidad de desagüe en presas ya existentes y para que el cuenco disipador de energía funcione correctamente, se propone la emulsión del flujo de la rápida mediante la disposición de aireadores en la misma [1]. La aireación artificial, además de disminuir o minimizar el riesgo de daños por cavitación, aumenta el calado del flujo y le hace perder velocidad. Por esto disminuye el número de Froude, generándose unas condiciones de entrada al cuenco menos exigentes para caudales mayores a los de diseño.

Un hito importante en la línea de investigación citada es la caracterización de los resaltos hidráulicos clásicos en flujos emulsionados. Para ello, se ha construido un canal de ensayos en el que se puedan generar resaltos hidráulicos en rangos altos de número de Froude del régimen supercrítico de entrada. El canal (figura 1) se ha diseñado para ensayar un flujo líquido con un caudal de hasta 4,00 l/s y números de Froude superiores a 4,5. El ancho libre es de 100 mm y la altura de 200 mm. La longitud del canal es de 289 mm, muy superior a la longitud del resalto que se genera con las condiciones hidráulicas existentes, y su pendiente horizontal. Al final del canal, una compuerta de 145 mm de altura y eje de giro horizontal en la solera permite modificar la condición de contorno de aguas abajo y por tanto generar un determinado resalto hidráulico. El sistema está dotado de un depósito y una bomba de alimentación con el fin de recircular el fluido. La bomba es capaz de suministrar 4,0 l/s a una altura manométrica de 7,5 mca y dispone de un variador de frecuencia, con el objetivo de poder variar el caudal. Además la instalación cuenta con un contador volumétrico y un medidor de impulsos para conocer volúmenes y

caudales suministrados por la bomba. El sistema cuenta igualmente con una alimentación de aire comprimido que permite forzar la mezcla agua-aire a la entrada del canal.



Figura 1. Canal construido para la caracterización de resaltos clásicos en flujos emulsionados.

Paralelamente a la fabricación del canal se diseñó la pieza situada en la cabecera o entrada al mismo y que realiza la transición entre el flujo de alimentación en presión y en lámina libre. Este dispositivo requiere de una especial atención, pues es necesario que asegure un reparto suficientemente homogéneo de caudales y cantidades de movimiento a la salida del dispositivo.



Figura 2. Dispositivo para transición flujo en presión – lámina libre con emulsionamiento del flujo y modelación numérica del dispositivo de laboratorio.

Mediante el análisis CFD se han ensayado las posiciones y ángulos de los deflectores y la embocadura facilitando el reparto de los flujos a través del dispositivo para los caudales más comprometidos. Se ha comprobado así el funcionamiento tanto para flujos monofásicos como bifásicos con diversas concentraciones agua-aire. La ejecución del modelo físico en laboratorio ha

permitido comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo. Así, se observa que la recirculación que tiene lugar en el interior no afecta significativamente al reparto equilibrado de caudales a través de los deflectores. Finalmente, este flujo supercrítico emulsionado generado permite ensayar los resaltos hidráulicos para todo el rango de números de Froude y concentraciones de aire previstas.

Referencias.

[1] Fernández Bono, J.F., Vallés Morán, F.J., 2006: "Criterios Metodológicos de Adaptación del Diseño de Cuencos de Disipación de Energía a Pie de Presa con Resalto Hidráulico, a Caudales Superiores a los de Diseño". AIHR, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Ciudad Guayana, Venezuela, octubre 2006.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "EL USO DE LA AIREACIÓN FORZADA DEL FLUJO EN RÁPIDAS COMO EXTENSIÓN DEL CAMPO DE UTILIZACIÓN DE LAS OBRAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA A PIE DE PRESA MEDIANTE RESALTO HIDRÁULICO" (BIA2011-28756-C03-01), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la Unión Europea.

Paralelización CUDA del método SPH. Aplicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas.

David López⁽¹⁾, Vicente Cuellar⁽²⁾, Miguel de Blas⁽¹⁾, Rubén Díaz⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos (CEH). david.lopez@cedex.es

⁽²⁾ Departamento de matemática e informática aplicada a la ingeniería. ETSICCP. UPM

El CEDEX ha desarrollado un software CFD propio (MDST), basado en el método SPH (Smoothed Particles Hydrodinamic). La incorporación de las técnicas de programación paralela MPI, que permite el cálculo paralelo en cluster de CPU, facilitó el desarrollo y calibración de esta herramienta para el análisis hidrodinámico de estructuras hidráulicas. La calibración se realiza combinando la experimentación física y numérica y se ha focalizado en la condición de fricción en el contorno y del modelo de turbulencia [1].

El desarrollo de la industria del video juego, con necesidades gráficas cada vez más exigentes ha propiciado un desarrollo espectacular de tarjetas gráficas GPU. Estos dispositivos también sirven para el cálculo computacional, con unas prestaciones en capacidad de cálculo equiparables a un clúster de CPU, pero con un coste mucho menor. Así, la supercomputación ha cambiado de estrategia, de forma cada vez hay más investigación dirigida en este sentido. Siguiendo esta tendencia el CEDEX ha desarrollado un modelo SPH en entorno FORTRAN CUDA (SPHERIMENTAL), para cálculo en tarjetas gráficas GPU. Esto ha permitido por un lado reducir considerablemente los tiempos de cálculo y por otro permitir el empleo de las técnicas de supercomputación en equipos mucho más económicos. Para el cálculo de rendimientos se ha empleado un test case basado en dam break.

En este paper se presentan algunos de los aspectos más innovadores introducidos en la versión CUDA del código SPH. Al tratarse de un modelo lagrangiano de partículas, es necesario buscar la partículas del entorno con las que interactúa cada partícula. Este proceso tiene un gran coste computacional. Se ha implementado un algoritmo original para optimizarlo, que ha proporcionado aceleraciones muy interesantes. Se incluye la comparación de rendimientos de cálculo con un cluster de CPU. Finalmente se presentan

algunas de las aplicaciones de este modelo en el análisis de estructuras hidráulicas.



Figura 1. Aplicación de MDST al funcionamiento de los desagües de fondo de la presa de Mularroya.

Referencias.

[1] López, D., Marivela, R., Garrote L. (2010) "Smooth particle hydrodynamics model applied to hydraulic structures: A hydraulic jump test case." Journal of Hydraulic Research, 48, Extra Issue, pp.142–158. ISSN: 0022-1686.

Un modelo acoplado Euleriano-PFEM para la simulación de sobrevertido en presas de escollera. Ensayo de calibración

Ángel Lara, Rafael Cobo

Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. rafael.cobo@cedex.es

1 Introducción.

En el mes de noviembre de 2010, el Ministerio de Economía y Competitividad a través de la subdirección General de proyectos e Investigación, resolvió la concesión de una ayuda para un Proyecto de Investigación Fundamental no orientada titulado Métodos numéricos y experimentales para la evaluación de la seguridad y protección de las presas de materiales sueltos en situación de sobrevertido. Este proyectos estaba compartido con el International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) de Barcelona Y la ETS de ICCP de la UPM Madrid. Los trabajos comenzaron el 1 de enero de 2010 y terminarán el 31 de diciembre de 2013.

El objetivo del proyecto es la caracterización del proceso de rotura de las presas de materiales sueltos por sobrevertido. El proyecto propuesto centra el esfuerzo en la caracterización de la rotura completa de la presa, incluyendo el colapso del elemento impermeable, ya sea éste un núcleo de arcilla o una pantalla asfáltica o de hormigón. Este análisis resulta indispensable para llegar a obtener criterios aplicables para el cálculo de los hidrogramas de rotura que se ha de realizar, según la normativa vigente, en todas las grandes presas existentes en España.

Como resultado de la investigación se obtendrá un modelo matemático basado en la combinación de métodos lagrangianos con métodos eulerianos, que permitirá simular la evolución de la rotura completa de la presa ante un episodio de sobrevertido.

El proyecto general se subdividió en tres subproyectos: BIAS2010-21350-C03-01 realizado por el CIMNE que sería el organismo encargado de implementar el modelo numérico; BIAS2010-21350-C03-02 desarrollado por el CEDEX que consistía en realizar los ensayos en modelos físicos reducidos necesarios y suficientes para calibrar y validar el modelo matemático y BIAS2010-21350-C03-03 desarrollado por la ETS de ICCP que tenía como objetivo diseñar y ensayar las protecciones de pie de presar necesarias para minimizar los daños provocados por el sobrevertido. También realizarían ensayos en modelo físico reducido para complementar los realizados por el CEDEX.

En este artículo se presentan los trabajos más relevantes realizados por el CEDEX y las principales conclusiones obtenidas hasta el momento

2 Ensayos de filtración y deformación del espaldón de aguas abajo.

En el modelo matemático se comenzó estudiando el proceso de filtración del agua a través del material de la presa; a continuación, mediante otro módulo, se modelizó la deformación del espaldón de aguas abajo y, por último, se procedió a realizar el modelo acoplado de ambos módulos.

El protocolo de trabajo establecía iniciar el ensayo con un caudal mínimo y mantenerlo hasta que la altura del agua en el espaldón de aguas arriba se estabilice. En ese momento se toman datos de presión. A continuación se incrementa el caudal y se mantiene hasta una nueva estabilización de la lámina de agua. Este proceso se repite hasta que se empieza a detectar algún movimiento de material en el espaldón de aguas abajo. Si el movimiento es de forma aislada y de piedras individuales, se considera que todavía estamos en fase de filtración. Cuando el movimiento se generaliza y se produce el desplazamiento de grupos más o menos grandes de piedras, se considera que ya se ha comenzado el proceso de deformación. El caudal anterior al comienzo de estos procesos se considera como el máximo caudal de filtración.

A partir de este punto se continúa el ensayo con los mismos criterios de incremento de caudal y estabilización de la lámina de agua, pero tomando nota de todos los procesos que se producen durante el periodo de estabilización del nivel de agua tomando una serie de características geométricas. El ensayo termina cuando la erosión del espaldón o la lámina de agua llega a coronación.

2.1 Desarrollo de un ensayo.

Se ensaya una presa de 1 m de altura, 20 cm de anchura de coronación y talud de 1V/1,5H en ambos espaldones. La presa está formada por material de un 15% de 12 mm y un 85% de 35 mm. Se comienza con un caudal de 4,7 l/s que da lugar a una altura de agua de 23 cm. El agua sale por el pie de la presa creando una lámina de agua de 3,3 cm. No se detecta ningún cambio.

Se aumenta el caudal hasta 13,2 l/s. La altura del agua se estabiliza a 44,5 cm de altura y el punto de salida está a 20 cm del pie de presa. Con un caudal de 25,6 l/s y cuando el agua alcanza 50 cm de altura, se producen algunos

desplazamientos de las piedras situadas en el pie de la presa. Con el mismo caudal y 65 cm de altura de agua se producen movimientos superficiales de cierta importancia. Se produce un inicio de incisión que alcanza 50 cm de longitud. Con 32,8 l/s y 73,2 cm de altura de agua, la incisión inicial se ensancha, el talud se desestabiliza y una pequeña masa superficial de material se desliza. el movimiento esta propiciado por el descalce de la parte inferior del talud y va progresando en una "onda" de desestabilización hacia arriba. Finalmente, para un caudal de 46,9 l/s y una altura de agua 87,2 cm, todo el talud ha sufrido un deslizamiento de material que afecta incluso a la coronación de la presa. En este momento se da por terminado el ensayo.



2.2 Resultados de los ensayos de presas.



Del conjunto de ensayos se pueden sacar las conclusiones siguientes:

• En la fase de filtración el agua sale por toda la anchura del espaldón a la misma altura, con pequeñas variaciones de algún centímetro.

- El inicio del movimiento se da siempre en el pie de presa y comienza en forma de piedras aisladas que no sufren un gran desplazamiento, a veces simplemente un giro sobre sí mismas.
- El paso siguiente consiste en el movimiento de pequeños grupos de piedras (3 o 4), igualmente en la parte inferior del espaldón.
- A continuación comienzan a desplazarse grupos de piedras que dan lugar a pequeñas brechas o incisiones longitudinales. Nunca se dan más de dos brechas simultáneamente (esto puede estar condicionada por la pequeña anchura del canal de ensayo) y aunque en inicio pueden ser de tamaños similar, rápidamente una de ellas aumenta su tamaño mucho más rápidamente que la otra.
- Otra forma de deformación es una movilización general de todo el ancho del espaldón, pero de forma tan superficial que prácticamente no se modifica el ángulo del talud.
- Las deformaciones se propagan siempre desde abajo hacia arriba, generando cabeceras de forma curvada y con escarpes muy pronunciados. En esta fase el agua comienza a aflorar por el pie de estos escarpes de cabecera, llegando a veces a salir por cotas inferiores a las que salía en fases anteriores del proceso.
- En las últimas fases de la deformación pueden caer grandes masas de piedras propiciada por descalce de los escarpes de cabecera.

3 Ensayos de permeabilidad.

La ley de resistencia empleada en el modelo matemático para la simulación del fenómeno de filtración corresponde a la definida por la ecuación de Ergun y que adopta la forma:

 $i = A \cdot v + B \cdot v^2$ [1]

donde: i = gradiente hidráulico v = velocidad del flujo

A, B = coeficientes de Ergun dependiente de la porosidad, del D_{50} del árido y de la viscosidad cinemática del agua

Para poder ajustar debidamente los coeficientes A y B, se construyó un equipo de ensayo de gran tamaño en el que poder determinar el gradiente hidráulico de los materiales empleados en las presas.

El equipo consta de tres tubos cilíndricos de 388 mm de diámetro interior y 2 m de longitud. La muestra se sitúa rellenando completamente el tubo intermedio.

En el tubo de la izquierda, el agua entra a través de un conducto perforado y garantiza que el agua llega a la muestra sin turbulencias. A lo largo del tubo hay siete puntos de medida de la presión hidráulica: uno en la zona de entrada de agua, cinco a lo largo del tubo de muestra y una en la zona de salida de agua.



Para garantizar la fiabilidad de las medidas, la presión registrada es la media de la existente en tres puntos equidistantes de la sección transversal en la que se realiza la medida.

Los materiales ensayados tenían un D_{50} de 12, 20, 35 y 45 mm y los caudales variaban de 1 l/s a 10 l/s, en intervalos de 1 l/s.

Se presentan a continuación dos gráficas correspondientes a los materiales de 12 y 45 mm. en el eje X se representa la distancia desde un punto "cero" de las diferentes tomas de presión y en el eje Y se representa la presión en cm de





En cada uno de los gráficos las correlaciones obtenidas para cada caudal son superiores al 99%. Esto se ha mantenido así para la totalidad de los ensayos

realizados. El gradiente hidráulico correspondiente a cada caudal viene dado por la pendiente de la recta correspondiente.

Por otra parte se puede calcular mediante la fórmula de Ergun (ver fórmula 1) el gradiente hidráulico para los mismos materiales y caudales y comparar los resultados.



Los resultados obtenidos ponen claramente de manifiesto que a partir de materiales superiores a un tamaño de 12 mm, la discrepancia entre el valor de la fórmula de Ergun y los resultados experimentales son cada vez mayores.

Esta discrepancia aumenta con el tamaño del material y con el caudal.

Bibliografía.

Larese De tetto, A. A coupled eulerian-PFEM model for the simulation of overtopping in rockfill dams. ETS d'Enginers de Camins Canals i Ports. Barcelona, mayo 2012

Larese De Tetto, A.; Rossi, R. y Oñate, E. simulation of the behavior of prototypes of rockfille dams during avertopping scenarios. Seepage evolution and beginning of failure. 11th Benchmarck Workshop on Numerical Analysis of Dams. Valencia 2011

Morán Moya, R. Mejora de la seguridad de las presas de escollera frente a percolación accidental mediante protecciones tipo repié. ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Madrid, 2013

Rojas Juárez, José Luis. Modelización numérica de la erosión por sobrevertido de presas de materiales sueltos cohesivos mediante el uso del modelo de sistema de partículas y elementos finitos (PFEM). ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Madrid, septiembre 2012

Siddique, S.; Blatz, J. A. y Privat, N. C. Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill Dams. Journal of Hydraulic engineering (ASCE), p. 1462-1469. November 2012.

Toledo, M. A.; Morán, R. y Campos, H. Modelación del movimiento del agua en medios porosos no lineales mediante un esquema de diferencias finitas. Aplicación al sobrevertido en presas de escollera. Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y diseño en Ingeniería. 28(4), 2012