

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 2015**

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Primera edición, 2016

© 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: En trámite

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 2015. 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, 25 de junio de 2015

Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez

PRESENTACIÓN

El presente libro recoge los resúmenes de las comunicaciones presentadas al Seminario organizado por la **Red de Laboratorios de Hidráulica de España** (RLHE) el día 25 de junio en la Universidad de A Coruña.

Estos Seminarios son la principal actividad de la RLHE, la cual se constituyó en el año 2008 como un foro encuentro entre los principales Centros de Investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España (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).

Las comunicaciones presentadas al Seminario fueron agrupadas en las conocidas como Líneas Prioritarias en las que las instituciones que integran la Red desarrollan su actividad, en concreto las siguientes:

- Línea prioritaria A: Criterios hidromorfológicos para la recuperación de espacios fluviales degradados
- Línea prioritaria B: Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses
- Línea prioritaria C: Riesgo asociado a la escorrentía urbana
- Línea prioritaria D: Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

Estos Seminarios constituyen un punto de encuentro muy importante entre los Centros de la Red, pues permiten a sus integrantes identificar proyectos de interés común e intercambiar experiencias de utilidad para la actividad de cada institución.

La presente publicación da continuidad a las que se editaron en los años anteriores con los resúmenes de cada uno de los Seminarios.

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

COMPARATIVA DE DIFERENTES TÉCNICAS ÓPTICAS PARA LA DETECCIÓN DE PECES (<i>Ángel Rico, Álvaro Rodríguez, Juan R. Rabuñal, Luis Peña, Jerónimo Puertas</i>).....	7
MEDICIÓN DE LAS OSCILACIONES DE BUQUES EN PUERTO CON TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL. PRUEBAS EN LABORATORIO DE HIDRÁULICA (<i>Álvaro Rodríguez, Juan R. Rabuñal, Enrique Peña, Fernando Costa, José Sande, Andrés Figuero</i>).....	11
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA SEMIÁRIDA DEL ALBUJÓN (MURCIA) (<i>Luis G. Castillo, María Dolores Marín, José M. Carrillo</i>)	15
MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE FLUJOS CON AGUA CLARA Y GRAVAS SOBRE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HUECOS EFECTIVO Y DE LA LONGITUD DE REJA REQUERIDA (<i>Luis G. Castillo, Juan T. García, José M. Carrillo</i>).....	19
ANÁLISIS HIDRÁULICO Y DE CALIDAD DE AGUAS DEL TANCAT DE MILIA. PROYECTO LIFE+ ALBUFERA (<i>Beatriz Nácher, Sara Gargallo, Carmen Hernández, Francisco J. Vallés, Miguel Martín</i>)	23

Resúmenes Línea Prioritaria B

Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses

ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DEL EMBALSE DE MARMOLEJO. INFLUENCIA EN LA INUNDABILIDAD DE ANDÚJAR (<i>David López, Rubén Díaz</i>)	29
--	----

Resúmenes Línea Prioritaria C

Riesgo asociado a la escorrentía urbana

ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS ANTE INUNDACIONES (<i>Eduardo Martínez, Manuel Gómez, Beniamino Russo</i>)	35
METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL CAMPO DE VELOCIDADES EN LOS IMBORNALES DE CAPTACIÓN (<i>Jackson Tellez, Manuel Gómez, Beniamino Russo</i>).....	39

VALIDACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TUBERÍAS CON SECCIÓN CIRCULAR Y OVOIDE (<i>Manuel A. Regueiro, Juan Naves, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez, Jose Anta</i>).....	43
DESARROLLO DE UN MODELO DUAL 1D/2D PARA EL CÁLCULO DEL DRENAJE URBANO: MODELO NUMÉRICO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL (<i>Ignacio Fraga, Luis Cea, Jerónimo Puertas</i>)	47
PLATAFORMA PARA EL ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CONDUCCIONES CON AGUA RESIDUAL URBANA EN LA EDAR DE A CORUÑA (<i>Joaquín Suárez, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Juan Naves, Manuel A. Regueiro</i>).....	49

Resúmenes Línea Prioritaria D

Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

CUANTIFICACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE AIRE ARRASTRADO SOBRE LA SUPERFICIE LIBRE DE FLUJOS SUPERCRÍTICOS EN CONDUCTOS CERRADOS INCLINADOS (<i>Sarai Díaz, Javier González</i>).....	55
ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS HIDRÁULICOS ASOCIADOS A LA COLOCACIÓN DE UNA COMPUERTA INFLABLE SOBRE UN ALVIADERO DE PRESA (<i>Sarai Díaz, Javier González</i>)	59
INFLUENCIA DE LA AIREACIÓN EN RÁPIDAS Y CUENCOS DE RESALTO LS-EMULSION (<i>David López, Rubén Díaz, Juan José Rebollo</i>).....	63
ANÁLISIS PRELIMINAR DE RESALTOS HIDRÁULICOS A PARTIR DE FLUJOS SUPERCRÍTICOS EMULSIONADOS. APLICACIÓN A LA ADAPTACIÓN DE CUENCOS AMORTIGUADORES (<i>Francisco J. Vallés, Juan Marco</i>).....	67

LÍNEA PRIORITARIA A

**CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE
ESPACIOS FLUVIALES**

Comparativa de diferentes técnicas ópticas para la detección de peces

Ángel Rico⁽¹⁾, Álvaro Rodríguez⁽¹⁾, Juan R. Rabuñal⁽²⁾, Luis Pena⁽³⁾, Jerónimo Puertas⁽³⁾

(1) Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidade da Coruña

(2) Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC)

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

La detección de peces es un proceso útil en entornos naturales. Un ejemplo son los ríos, en donde los peces deben sortear obstáculos, como presas, centrales hidroeléctricas y otros con la ayuda de estructuras hidráulicas que permiten el movimiento de los peces aguas arriba en los ríos. Conocer la densidad de los peces que pasan por estas estructuras puede ayudar a conocer la eficacia de las mismas, así como conocer características migratorias de las especies.

Otro escenario donde cobra interés la detección de peces son los espacios reservado a la cría o cuarentena de especímenes, así como espacios más industriales como pueden ser las granjas de peces. En estos entornos es esencial conocer el tamaño de los individuos.

Se han estudiado diferentes tipos de técnicas ópticas para aplicar en este contexto:

- Visión artificial
- Láser 2D
- Láser 2D combinado con visión artificial
- Kinect
- Kinect combinado con visión artificial
- Visión estereoscópica combinada con visión artificial

La primera técnica es el uso de visión artificial aplicada a las imágenes que transmite una cámara sumergida. Esta técnica es la más barata de todas a nivel hardware ya que la mayor parte del coste reside en el software y las técnicas de visión artificial aplicadas. Por el contrario no se ha realizado el proceso en tiempo real.

La segunda técnica utilizada es un sensor láser 2D que devuelve distancias a las que se encuentran los objetos. Las principales ventajas de esta técnica son que permite una rápida detección del objeto y que esta puede ser en tiempo real, así como que por un coste no demasiado elevado se puede adquirir un sensor de este tipo. Esta técnica tiene la desventaja de que la distancia que puede alcanzar el láser en el agua disminuye con respecto a la que podría alcanzar fuera de ella, no solo por el efecto del agua y su posible turbidez, sino también por el elemento que lo aísla del contacto con el agua. Del mismo modo los valores de distancia directamente aportados no se ajustan a la realidad debido a la reflexión y refracción que produce el agua. Otras desventajas de esta técnica es que detecta pero no es capaz de diferenciar objetos, así como que la velocidad de paso del objeto condiciona la representación de ese objeto.

Esta técnica combinada con visión artificial da lugar a la tercera técnica y permite mejorar la técnica anterior ya que añadiendo una cámara que tome imágenes en el momento en el que el láser detecte un objeto se puede analizar, mediante técnicas de visión artificial, si el objeto es un pez o no.



Figura 1. Láser 2D con cámara para combinar con visión artificial

La cuarta técnica probada consiste en un láser 3D. Para ello se ha utilizado la Kinect, que es una cámara de profundidad que mediante una nube de puntos infrarrojos y con la detección de eco permite la obtención de un mapa de puntos en 3 dimensiones de la escena. Con este método se consigue una buena detección de peces pero tiene el inconveniente de que el dispositivo requiere que se encuentre a una distancia mínima del objeto para poder medir. El mínimo son 40 cm. Otro inconveniente es que, al igual que en el caso del

sensor 2D comentado anteriormente, la medición de distancias varía al sumergirlo en el agua.

Del mismo modo que en el caso del láser 2D y aprovechando que la Kinect dispone de una cámara de vídeo integrada, se pueden aplicar técnicas de visión artificial con el objetivo de conseguir una mejor detección de los peces.

La última técnica aplicada es la visión estereoscópica combinada con visión artificial. La visión estéreo se fundamenta en el hecho de que la profundidad de cualquier punto del espacio se calcula en base a la diferencia de posición de su proyección en un par de imágenes. Se necesitan pues, 2 cámaras de vídeo para poder tener ese par de imágenes y estas cámaras deben de poder sincronizarse para tener la imagen del mismo punto en el mismo instante. La ventaja principal de esta técnica es que permite realizar medición de objetos y no hay la distorsión en el agua que si ocurría en las técnicas laser. Por el contrario, esta técnica tiene la desventaja de que la precisión depende de haber realizado una buena calibración de las cámaras y del algoritmo de disparidad aplicado, así como de la distancia a la que se encuentren los objetos, ya que cuanto mayor sea la distancia la precisión de la técnica disminuye. Esta técnica no ha sido aplicada en tiempo real.



Figura 2. Mediciones realizadas con visión estéreo y visión artificial

Agradecimientos.

Financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688) y Fondos FEDER. Así mismo se agradece la colaboración del Centro de estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).

Medición de las oscilaciones de buques en puerto con técnicas de visión artificial. Pruebas en laboratorio de hidráulica

Álvaro Rodríguez⁽¹⁾, Juan R. Rabuñal⁽²⁾, Enrique Peña⁽³⁾, Fernando Costa⁽³⁾, José Sande⁽³⁾, Andrés Figuero⁽³⁾

⁽¹⁾ Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidade da Coruña

⁽²⁾ Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC)

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

El estudio y caracterización de los desplazamientos de buques amarrados tiene una gran relevancia en el diseño de mecanismos de amarraje y anclaje, y es asimismo fundamental en la prevención del movimiento de la carga, la predicción y minimización de los daños en el muelle y el barco debido al oleaje o el viento, o la optimización de las operaciones que tienen lugar mientras el buque está amarrado (carga y descarga...).

Para la medición de este fenómeno, se ha desarrollado una técnica basada en el uso de Visión Artificial, un campo de la Inteligencia Artificial que permite la obtención procesamiento y análisis de la información contenida en imágenes digitales.

Así, en el sistema desarrollado se utilizan una o varias cámaras de video convencional para grabar el buque de interés mientras está amarrado en el puerto (figura 1). Posteriormente, se utilizan técnicas avanzadas de análisis de imagen para calcular los movimientos del navío.

Estas técnicas utilizan modelos matemáticos de proyección y deformación combinados con técnicas de búsqueda local, basadas en la comparación y correlación estadística de regiones de la imagen, para obtener un modelo del desplazamiento del buque a lo largo del tiempo en una escala de medición real.

La técnica propuesta se ha sometido a una serie de pruebas realizadas en el Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC), en A Coruña. Durante estos ensayos, la técnica desarrollada se ha ensayado

en l
disp

un

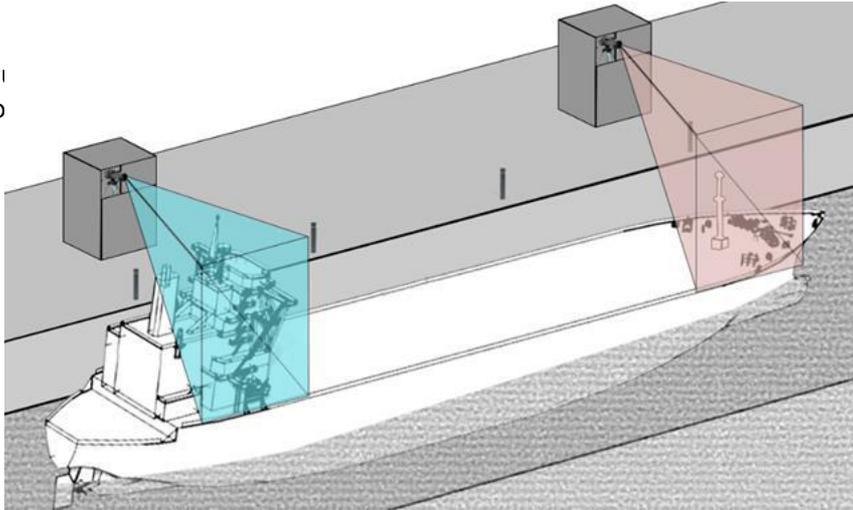


Figura 1. Esquema de la colocación de los dispositivos de grabación para grabar los desplazamientos del buque de interés

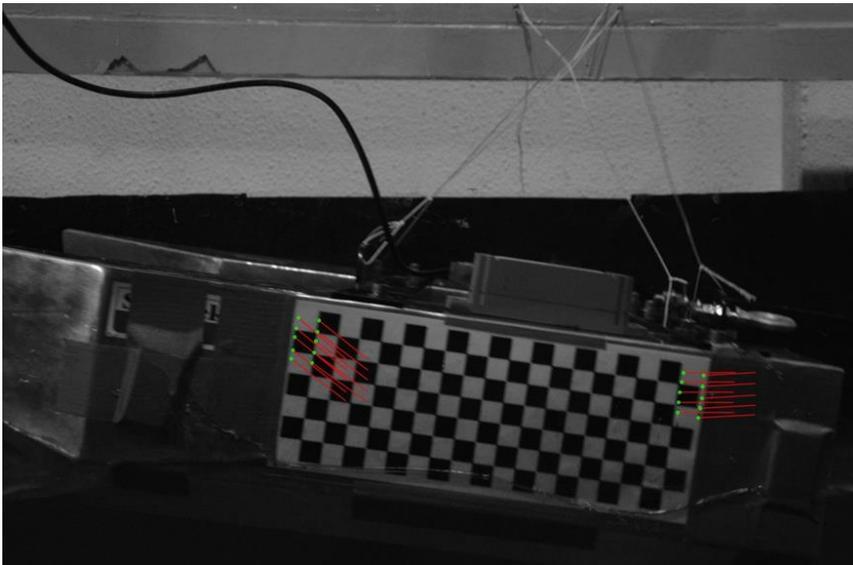


Figura 2. Imagen obtenida durante uno de los ensayos con un modelo de embarcación a escala. Se muestran los vectores de movimiento calculados a través del sistema de visión artificial

Los resultados obtenidos, que se han comparado con mediciones obtenidas por dispositivos inerciales instalados en el modelo, han servido para validar la técnica propuesta. Demostrando que la medición de los desplazamientos de un

buque amarrado a través de técnicas ópticas, sin contacto y sin necesidad de realizar ninguna intervención en el navío es factible.

Además, en las pruebas realizadas se ha obtenido una precisión comparable a la obtenida con técnicas de coste mucho más elevado, revelándose un potencial de aplicación futuro muy prometedor para la técnica desarrollada.

Agradecimientos.

Financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688) y Fondos FEDER. Así mismo se agradece la colaboración del Puerto de A Coruña.

Transporte de sedimentos en la cuenca semiárida del Albuji3n (Murcia)

Luis G. Castillo, Mar3a Dolores Mar3n, Jos3 M. Carrillo

Grupo de I+D+i Hidr@m. Universidad Polit3cnica de Cartagena

Los flujos torrenciales hiperconcentrados que se presentan en las ramblas de la geograf3a peninsular provocan grandes inundaciones con efectos muy destructivos sobre el medio y las personas. Este hecho se est3 viendo incrementado por el cambio clim3tico, con un efecto directo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitaci3n. Recientes observaciones muestran que en estas zonas se producen lluvias m3s intensas y menos frecuentes. Esto se traduce en un n3mero escaso de avenidas con elevados caudales y velocidades, y una gran proporci3n de transporte de materiales s3lidos.

La figura 1 muestra el puente viejo o de San Francisco, construido en 1916, situado en la parte media de la Cuenca del Albuji3n. En este sector, el lecho del cauce tiende a estar seco la mayor parte del tiempo y los episodios de avenida son muy escasos en frecuencia y duraci3n.



Figura 1. Puente de San Francisco situado en Fuente 3lamo (Murcia) en situaci3n habitual y durante la avenida del 28/09/2012

Los flujos generados en los cauces ef3meros no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse, ya que la elevada concentraci3n de sedimentos los inutilizar3a en poco tiempo. Se requiere la construcci3n de sistemas de control y captaci3n espec3ficamente dise3ados para este tipo de flujos.

Con este fin será necesario, como primer paso, conocer las características hidrológicas e hidráulicas de los cauces donde se situarán dichas obras.

Dentro de la caracterización de los cauces efímeros, propios de zonas semiáridas, la cuantificación de la capacidad de transporte de sedimentos es imprescindible. En un siguiente paso se realiza el cálculo la capacidad de transporte de sedimentos.

De acuerdo a los análisis presentados para el caso del barranco de las Angustias (Isla de la Palma) y partiendo de la gran similitud con las cuencas semiáridas de la Región de Murcia, uno de los objetivos del trabajo que el grupo Hidr@m está llevando a cabo es aplicar y contrastar dicha metodología. Se busca establecer criterios generales de cálculo en estas regiones.

Ateniendo a la problemática, basándonos en experiencias similares y los principales resultados obtenidos, en este trabajo se presentará un avance de los resultados obtenidos en la evaluación del transporte de sedimentos realizado en la Rambla del Albuñón, situada en el Campo de Cartagena (Región de Murcia).

Se han evaluado los caudales líquidos y sus correspondientes caudales sólidos para diversos escenarios. Se han aplicado diversas formulaciones de transporte de sedimentos que según la bibliografía se podrían adaptar a las condiciones de este tipo de cuencas: Meyer-Peter y Müller (1948), Ackers-White (1990), Yang (1976), Einstein y Barbarrosa (1952), y Yang S. (2005). Además se han analizado otras expresiones más específicas para ríos de montaña y alta pendiente propuestas por: Smart y Jaeggi (1983), Mizuyama y Shimohigashi (1985), Van Rijn (1987) y Aguirre-Pe et al. (2000).

Mediante un proceso iterativo se ha llevado a cabo el acoplamiento de las características hidráulicas con las formulaciones de transporte de sedimentos. En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de transporte en una rambla de la Cuenca del Albuñón.

De igual forma, se están realizando estudios de comportamiento hidráulico mediante simulaciones numéricas (HEC-RAS e Iber), para acotar la resolución del problema del transporte de sedimentos existente en los cauces efímeros.

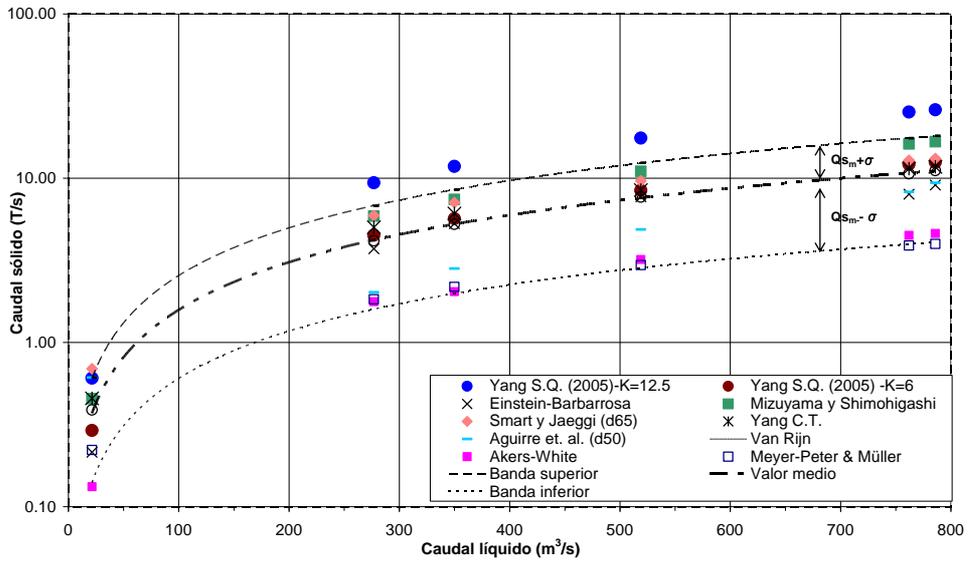


Figura 2. Caudal sólido en función del caudal líquido (rambla del Mergajón en la cuenca del Albuñón)

Medición experimental de flujos con agua clara y gravas sobre sistemas de captación de fondo. Determinación del índice de huecos efectivo y de la longitud de reja requerida

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

Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT

Los sistemas de captación de fondo consisten en una serie de rejas situadas en el lecho del cauce con la intención de captar la máxima cantidad de agua en ríos de montaña, de fuertes pendientes y lechos irregulares en los que se encuentra un importante transporte de sedimentos y caudales de avenida. Debido a que la carga de transporte de fondo pasa sobre la reja, estas estructuras tienen que operar bajo condiciones extremas (Bouvard, 1992). La mayoría de los criterios de diseño tratan de evitar la oclusión de las rejas debido a la deposición de materiales granulares de diámetro superior al espaciamiento entre los barrotes. Así, los parámetros de diseño principales son:

- Espaciamiento entre barrotes, superiores al mayor tamaño de grano transportado.
- Pendiente longitudinal de la reja. El incremento en la pendiente de la reja reduce la sedimentación sobre la misma.
- Incremento del área de huecos de la reja considerando un porcentaje de superficie ocluida.
- Construcción de un depósito de sedimentación aguas arriba que regula el tamaño de los sólidos que alcanzan la reja.

Actualmente existen estudios sobre el grado de oclusión de la reja como consecuencia de la deposición de sólidos sobre éstas, o de la cantidad de sedimentos que se introducen en la reja y que son transportados a lo largo del canal de derivación (Ract-Madoux *et al.*, 1955; Simmler, 1978; Drobir, 1981; Bouvard, 1992; Raudkivi, 1993; Ahmad y Kumar, 2010).

Uno de los objetivos 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.

Para evaluar el efecto del transporte sólido sobre la reja, la campaña experimental se ha llevado a cabo con dos materiales clasificados como gravas cuyos diámetros característicos son $d_{50} = 8.3$ mm (grava 1), y $d_{50} = 14.8$ mm (grava 2).

La grava 1 se ha utilizado con la reja de índice de huecos $m = 0.16$, considerando tres caudales específicos (77.0, 114.6, y 155.4 l/s/m), y diversas pendientes (0, 10, 20, 30, y 33%).

La grava 2 se ha empleado con las rejas de índice de huecos $m = 0.22$ y $m = 0.28$, y para los caudales específicos 114.6, 138.88 y 155.4 l/s/m. En estos ensayos se han empleado las mismas configuraciones de pendiente.

En todos los casos, el caudal sólido al inicio de la reja es de $q_s = 0.33$ kg/s. El punto de entrada de los sólidos se sitúa al inicio del canal de aproximación, a una distancia de 5 m del inicio de la reja. Considerando el rango de caudales analizado, la concentración de sólidos en volumen varía entre 0.16 y 0.34%, dependiendo del flujo de agua clara ensayado.

Cada ensayo se ha repetido en dos ocasiones, obteniéndose un total de 60 ensayos en laboratorio. Las pruebas se han mantenido hasta que todo el material sólido alcanza la reja. La duración del ensayo ha estado entre 700 y 1620 segundos.

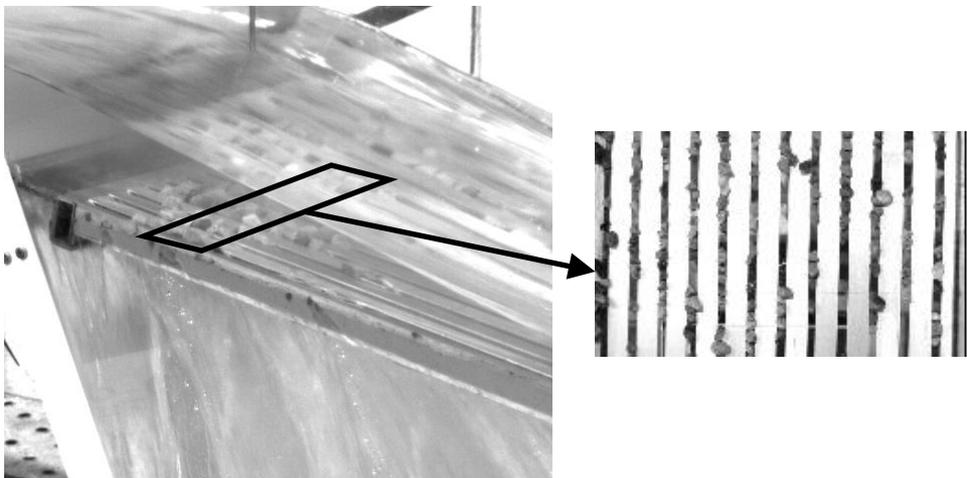


Figura1. Ensayo de gravas sobre reja de fondo y situación de oclusión al final de experimento

Los resultados han permitido estimar los índices de huecos efectivos así como las longitudes de reja necesaria para captar todo el caudal, teniendo en cuenta el fenómeno de la oclusión. Se han relacionado dichos parámetros con las características del flujo y de la reja con la intención de generalizar los resultados y poder extenderlos a otros casos. Los resultados obtenidos en laboratorio se comparan con los propuestos por diversos autores.

Referencias bibliográficas.

Ahmad, Z., and Kumar S., 2010. Estimation of trapped sediment load into a trench weir, 11th International Symposium on River Sedimentation (ISRS), University of Stellenbosch, South Africa, Sept. 6-9, 2010, pp.1-9.

Bouvard, M. 1992. Mobile Barrages & Intakes on Sediment Transporting Rivers. IAHR Monograph. Rotterdam: Balkema.

Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and García, J.T. 2013). Comparison of clear water flow and sediment flow through bottom racks using some lab measurements and CFD methodology. Proc. Seven River Basin Management. Wessex Institute of Technology; New Forest, 22-24 May 2013.

Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and García, J.T. 2013b. Flow and sediment transport through bottom racks. CFD application and verification with experimental measurements. Proc. 35th IAHR Congress, Chengdu, 8-13 September 2013.

Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and García, J.T. 2013c. Comparativa del flujo de agua limpia y con sedimentos a través de sistemas de captación de fondo utilizando datos de laboratorio y un modelo CFD. Proc. III Jornadas de Ingeniería del Agua, Valencia, 23-24 October 2013

Castillo, L.G.; García, J.T., and Carrillo, J.M. 2014. Experimental measurements of flow and sediment transport through bottom racks. Influence of graves sizes on the rack. Proc. International Conference on Fluvial Hydraulics (RIVER FLOW), Lausanne, Switzerland, 3-5 September 2014

Drobir, H. 1981. Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. In, Österreichische Wasserwirtschaft: 11(12): 243-253.

Krochin, S. 1978. Diseño Hidráulico. Segunda Edición. Colección Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Análisis hidráulico y de calidad de aguas del Tancat de Milia. Proyecto LIFE+ Albufera

Beatriz Nácher, Sara Gargallo, Carmen Hernández, Francisco J. Vallés, Miguel Martín

Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València.

En el marco del proyecto LIFE12 ALBUFERA “Gestión integrada de tres humedales artificiales en cumplimiento de las directivas Marco de Aguas, Aves y Hábitats” se está llevando a cabo el seguimiento del funcionamiento hidráulico y ambiental de tres humedales artificiales. Los principales resultados de uno de ellos, el Tancat de Milia (figura 1), alimentado con aguas altamente eutrofizadas, se presentan a continuación tras 18 meses de seguimiento.

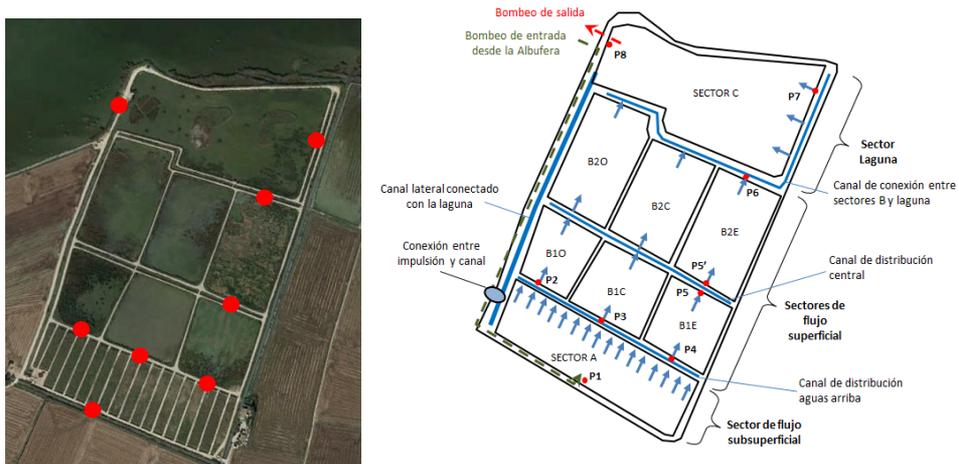


Figura 1. Tancat de Milia. Puntos de muestreo y diagrama de flujos

La monitorización de la calidad del agua en el humedal es esencial para poder evaluar la eficiencia del tratamiento de contaminantes. Para ello, se recogen periódicamente muestras de aguas sobre las que se analizan variables físico-químicas. Estas variables son el nitrógeno total (NT) y nitrógeno inorgánico disuelto ($N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$ and NO_3^-), fósforo total (PT) y fosfatos, sílice

inorgánica, alcalinidad, materia orgánica (DQO), sólidos suspendidos y sólidos volátiles, clorofila a, oxígeno disuelto, conductividad, pH y temperatura.

El control de la hidráulica en el humedal es necesario para asegurar que se mantienen los parámetros - calados, cargas hidráulicas superficiales, tiempos de retención hidráulica - definidos en la estrategia de gestión. Además, en el Tancat de Milia, la alimentación se realiza por bombeo y de manera discontinua, lo que influye en el funcionamiento hidráulico de todos los sectores monitorizados.

3La campaña de monitorización se diseñó para poder aforar caudales circulantes en distintos puntos del ciclo de bombeo (repetida de manera más o menos uniforme cada 24 horas). Además, en los puntos donde la variación diaria de caudales es más acusada, se instaló una sonda de nivel para poder obtener datos continuos a lo largo de un periodo de tiempo suficiente. Con los datos recogidos, se puede observar como el pico y duración del bombeo se van atenuando por la acción laminadora de los sectores de flujo superficial (figura 2).

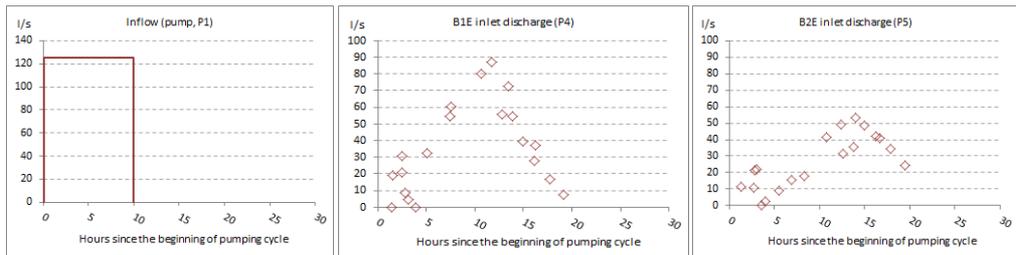


Figura 2. Evolución de caudales (entrada por bombeo – salida subsuperficial – salida superficial)

Los datos hidráulicos y de consumo de las bombas permitieron realizar un análisis energético mediante el cual se mejoró la eficiencia del ciclo de bombeo, así como el funcionamiento del humedal en general.

En cuanto a los resultados de calidad, el sector de flujo subsuperficial (flujo a través de un medio poroso) presenta una reducción considerable de contaminantes particulados (no tanto en disueltos) cuando se compara con un sector de flujo superficial. La existencia de un sector tipo laguna también empeora negativamente la calidad del agua (tabla 1), aunque funciona bastante bien en la eliminación de nutrientes limitantes en el medio receptor.

Tabla 1. Escorrentías generadas por ambas cubiertas para el evento del 25/04/2013

	SECTOR A	HUMEDAL COMPLETO
COD	57	50
TSS	82	70
TP	55	65
TN	59	61
NO₃⁻	61	82

Al finalizar el periodo de monitorización (de 24 meses), a los resultados obtenidos en cuanto a funcionamiento hidráulico y calidad de aguas, se incorporarán a aquellos relacionados otros aspectos también estudiados en el proyecto (fito y zooplancton, macroinvertebrados, ictiofauna, avifauna...), para poder definir la mejor estrategia de gestión conjunta de los humedales.

LÍNEA PRIORITARIA B

HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES

Estudio sedimentológico del embalse de Marmolejo. Influencia en la inundabilidad de Andújar

David López, Rubén Díaz

Laboratorio de Hidráulica. CEH. CEDEX.

La presa de Marmolejo situada en el cauce del río Guadalquivir en el término municipal de Marmolejo, construida en 1962 con fines de aprovechamiento hidroeléctrico, se explota habitualmente al nivel máximo normal (NMN), que corresponde con la cota superior de las compuertas del aliviadero (191.78 msnm). La capacidad inicial del embalse de acuerdo con la topografía de 1962 era de 13 Hm³. En estas condiciones la cola de embalse se sitúa aguas arriba del puente de la autovía A-4 sobre el río Guadalquivir en el término municipal de Andújar. El régimen hidromorfológico de este tramo de río, con una longitud aproximada de 16 km, se encuentra alterado, favoreciendo la sedimentación de los aportes sólidos. Esto ha limitado la capacidad de cauce durante algunos episodios de avenida ocurridos desde su construcción.

Partiendo de la información disponible en los estudios realizados con anterioridad TYPESA (1997), INTECSA-INARSA (2002 y 2003) para analizar la problemática de las inundaciones en este tramo del río, y complementándola con nuevos trabajos batimétricos, ha sido posible reproducir la geometría del cauce del río Guadalquivir antes de la construcción de la presa en 1962, tras su puesta en explotación en 1963, tras las inundaciones de 1997 y de 2001 y en la actualidad, CEDEX (2014).

Se ha realizado un estudio hidráulico bidimensional con Iber del tramo del río Guadalquivir comprendido entre la presa de Marmolejo y el Molino de Aceña, que ha sido calibrado con los registros de nivel realizados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en diferentes episodios de avenida, en especial las realizadas el 13 de marzo y de 2 abril de 2013. Se ha estudiado el funcionamiento hidráulico del río en cada uno de los escenarios indicados, para cuatro combinaciones de caudal correspondientes a episodios de avenida de ente 2.34 y 45.1 años de período de retorno. Esto ha permitido obtener los niveles de lámina y superficies de inundación en cada uno de los escenarios considerados para realizar un análisis comparativo. En estas simulaciones se han considerado las compuertas completamente levantadas para facilitar el desagüe de la avenida. El resultado de las simulaciones hidráulicas muestra

que el sedimento retenido en el embalse limita la capacidad del mismo que a partir de ciertos niveles de sedimentación del embalse eleva los niveles de inundación en Andújar. Además se ha comprobado que la expansión urbanística de Andújar en estos último 50 años ha ocupado zonas del cauce que eran tradicionalmente inundables.

Se han estudiado diferentes actuaciones a fin de aumentar la seguridad frente a inundaciones de Andújar (figura 1). La actuación propuesta consta de una serie de motas de protección y unos dragados localizados en el entorno urbano, que protegen Andújar sin elevar los niveles aguas arriba del tramo estudiado. En cualquier caso, la efectividad de todas estas actuaciones en el entorno urbano queda condicionada al mantenimiento de la sedimentación del embalse en los niveles de 2014 o inferior.

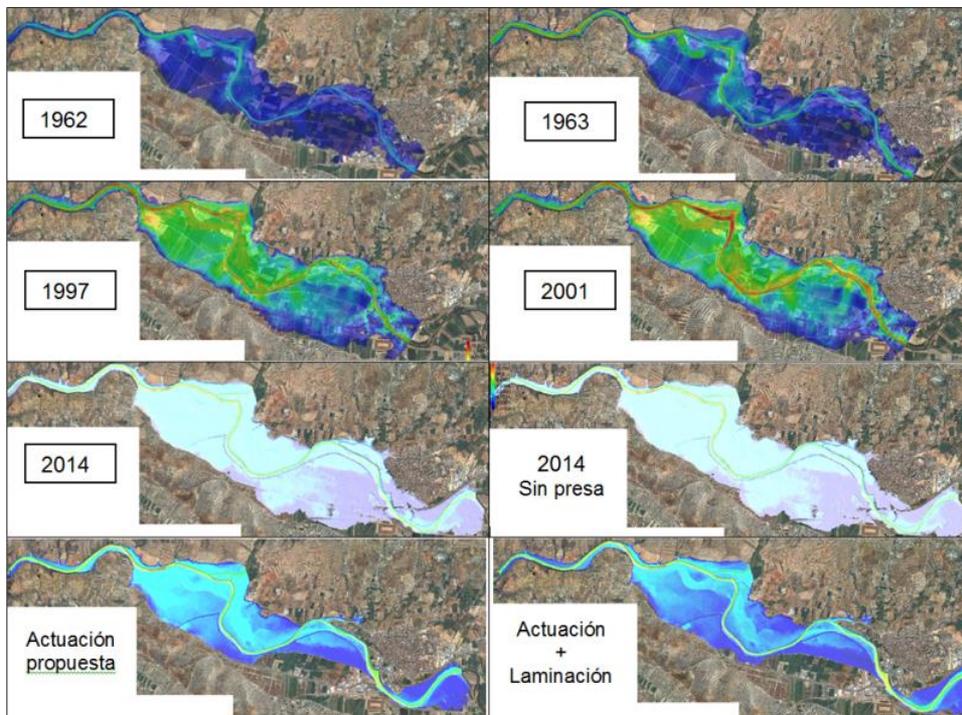


Figura 1. Comparación de la mancha de inundación en los escenarios analizados para la combinación de caudales Q_1

Se ha implementado un modelo sedimentológico del embalse. Las entradas de este modelo son el aporte de sedimento, la serie histórica de caudal medio diario desde 1963 hasta la actualidad y la consigna de explotación del embalse. La información batimétrica ha permitido calibrar la tasa de aporte de sedimento al embalse y la tasa de erosión, lo que ha permitido reproducir su historia sedimentológica.

Para determinar el aporte de sedimentos al embalse de Marmolejo se ha definido la cuenca de drenaje del embalse, se ha establecido de la red hidrográfica de la cuenca, se aplicó el método RUSLE de la cuenca y se ha calculado el coeficiente de entrega de sedimentos (CES). Esto ha proporcionado una tasa de entrega al embalse de entre medio y un millón de toneladas año.

Otro input del modelo es la serie histórica de caudales medios diarios desde 1962 hasta la actualidad. Y finalmente es necesario conocer la consigna de explotación del embalse. De acuerdo con la información disponible, en el año 1997 se produjo un cambio en la consigna de explotación. El embalse de Marmolejo, de aprovechamiento hidroeléctrico, se explota habitualmente al nivel máximo normal (NMN), que corresponde con la cota superior de las compuertas del aliviadero (191.78 msnm). Previamente a la avenida de 1997, el embalse se explotaba manteniendo ese nivel, levantando parcialmente compuertas para desaguar los excedentes no turbinables, y solamente cuando el caudal circulante por el río superaba el umbral de los 300 m³/s, se procedía al alza total de compuertas para facilitar el desagüe de la avenida. Tras las inundaciones de 1997, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir recomendó modificar la consigna de explotación para reducir la sedimentación en el embalse. De acuerdo con los datos disponibles, ENDESA modificó la consigna reduciendo el umbral de alza de compuertas a un caudal 150 m³/s., en la rama ascendente del hidrograma, y adoptando como caudal de descenso de compuertas 300 m³/s en la rama descendente del hidrograma.

El modelo sedimentológico del embalse considera que en fase de explotación normal, con compuertas cerradas, se produce sedimentación neta, con una tasa de retención (Brown, 1953) que depende de la capacidad de embalse disponible (Brune, 1953 y Churchill, 1948)) y de la densidad del sedimento almacenado sometido a un proceso de consolidación (Miller, 1953).

Por otro lado, el modelo considera que se produce una erosión neta en el embalse cuando se elevan las compuertas en episodios de avenida. Téngase en cuenta que el labio fijo queda la cota 185.78 msnm y el calado aguas arriba

es muy pequeño, por lo que la capacidad de arrastre es semejante a la existente sin presa. Por tanto, se ha calibrado una tasa de erosión asociada al volumen del hidrograma que permite ajustar los valores de colmatación registrados en las batimetrías de 1997, 2001 y 2014.

Este modelo ha permitido reproducir la evolución sedimentológica del embalse y proporciona una herramienta para definir una estrategia de explotación sostenible del embalse compatible con la seguridad de Andújar.

Referencias.

BRUNE, GUNNAR M., 1953. "Trap Efficiency of Reservoirs," Transactions of American Geophysical Union", vol . 34, No. 3, June 1953.

BROWN, C.B., "Discussion of Sedimentation in reservoirs, by J. Witzig". Proceedings of the American Society of Civil Engineers 69,1493–1500. 1943.

CEDEX, 2014 Modelación hidráulica de los ríos Guadalquivir y Jándula en el entorno urbano de Andújar (Jaén) y análisis de la influencia de la presa de Marmolejo. Documento de síntesis de los estudios realizados con anterioridad.

CHURCHILL, M. A., 1948. Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data," by L. C. Gottschalk, pp. 139-140, Proceedings, Federal Interagency Sedimentation Conference, Denver, Colorado, January 1948.

INTECSA – INARSA, 2002. Estudio de la sedimentación en el embalse de Marmolejo.

INTECSA – INARSA, 2003. Estudio de transporte y sedimentación en el tramo del río Guadalquivir que comprende el encauzamiento proyectado en las inmediaciones de Andújar .

MILLER, CARL R., "Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations" Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1953.

TYPSA, 1997. Estudio hidráulico de detalle del río Guadalquivir en el tramo La Ropera – Andújar

LÍNEA PRIORITARIA C
RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA

Estabilidad de vehículos ante inundaciones

Eduardo Martínez⁽¹⁾, Manuel Gómez⁽¹⁾, Beniamino Russo⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto FLUMEN – UPC

⁽²⁾ Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA)

Introducción.

Los vehículos son componentes que hoy en día están muy presentes en las ciudades y, aunque desde el punto de vista medioambiental existen muchas discusiones al respecto, parece que la tendencia en número de vehículos es ascendente. Por tanto, al ser éstos componentes de la ciudad de consideración imprescindible cuando se dan inundaciones, merecen el análisis de la peligrosidad a la que se ven sometidos en dichas inundaciones. Se trata de elementos, cuya peligrosidad se determina con el análisis del inicio de pérdida de estabilidad, ya sea por flotación, deslizamiento o vuelco. Por un lado los vehículos presentan ventajas en su análisis, con respecto al estudio de la inestabilidad de personas, puesto que la maniobrabilidad, habilidades y aspectos psicológicos de las personas no se tienen en cuenta, pero por otro lado la integridad de las personas que ocupen el vehículo puede verse afectada al mismo tiempo (daños intangibles). Este concepto fue tenido en cuenta en el criterio de estabilidad de vehículos propuesto por la AR&R (2011) [1], considerando en una misma gráfica los límites de inestabilidad de flotación (calado máximo) y de deslizamiento (velocidad mínima) con la función límite de estabilidad para personas (calado x velocidad), que separaba la zona segura e insegura en cuanto a la estabilidad de éstas en caso de abandonar el vehículo.

Los daños tangibles producidos por los vehículos pueden ser directos, afectando al vehículo, o indirectos cuando, una vez perdida la estabilidad, se encuentran en suspensión y pueden colisionar con cualquier estructura urbana al ser arrastrados por el flujo de agua. Es posible entender por tanto, los vehículos como grandes escombros arrastrados por el agua que pueden representar cuantiosos daños económicos y suponer graves consecuencias para la seguridad de las personas. Es un claro ejemplo la gran inundación producida en Boscastle (Reino Unido) el 16 de agosto de 2004, ocasionada por una lluvia extrema de 200 mm en 5 horas de duración, que supuso millones de libras en reparaciones de daños y un arrastre de más de un centenar de vehículos. Dicho arrastre de vehículos ocasionó el bloqueo de un puente que

llegó a colapsar agravando notablemente los daños producidos. Dicho evento, uno de los más dañinos de los últimos años en el Reino Unido, sirvió de motivación para retomar el análisis de la inestabilidad de vehículos [2], tras siete años sin investigaciones en inestabilidad de vehículos después de los estudios de Keller y Mitsch (1993) [3]. Sucesos de este tipo, con mayor o menores consecuencias, no dejan de producirse; y en España en los últimos años también se han producido inundaciones urbanas muy dañinas, como la acaecida en Tenerife el 19 de octubre de 2014 con 139.2 litros por metro cuadrado caídos en unas 15 horas (figura 1). Estos datos solo fueron superados el 22 de marzo de 2002 en los últimos 70 años, y en esta ocasión supuso la paralización completa de la ciudad e incluso se produjo el fallecimiento de una mujer de 56 años al ser arrastrada por la escorrentía. Gran cantidad de vehículos fueron arrastrados también y ocasionando importantes daños económicos. Se trata por tanto de una problemática importante en todas las ciudades del mundo que debe ser estudiada con la rigurosidad que merece.



Figura 1. Inundación producida en Tenerife el 10 de octubre de 2014 (139.2 l/m² en unas 15 horas)

La estabilidad de los vehículos, quedará comprometida por tanto cuando las variables hidráulicas, calado y velocidad, superen un cierto umbral. Estas variables ya fueron tenidas en cuenta (y , v , $y-v$) para determinar la estabilidad de los peatones, y en este caso se consideraran igualmente pero relacionándolas con las características de los vehículos. Son varias las características que pueden influir en la estabilidad de un vehículo, pero en esencia será el peso, la altura libre hasta el suelo, la superficie en planta y la hidrodinámica de la forma del vehículo en la dirección del flujo las que afecten al “grado de inestabilidad del mismo”.

Desde los primeros vehículos, éstos han ido adaptándose a las nuevas tecnologías y adoptando formas con medidas diferentes. Algunos de estos cambios, como una mayor forma aerodinámica que beneficia la estabilidad, pero por el contrario la adopción de menores alturas libres hasta el suelo favorece la inestabilidad. Se trata por tanto de componentes de la ciudad que requieren ser estudiados desde el punto de vista de su estabilidad cuando se ven sometidos a una corriente de agua, pero los cuales van modificando sus características a lo largo del tiempo, y cada vez se encuentran más variedades de modelos. En este sentido, los estudios requeridos deben ofrecer soluciones lo más generalistas posibles que puedan garantizar límites de seguridad para cualquier tipo de vehículo, ya sea actual o más antiguo.

Análisis experimental de la estabilidad de vehículos.

Hasta el momento, los estudios experimentales sobre estabilidad de vehículos en inundaciones se han llevado a cabo a partir de vehículos a diferentes escalas, y que asegurando exhaustivamente los principios de semejanza de Froude los resultados fueron escalados a prototipo. La variedad de los vehículos ensayados no parece la adecuada para poder obtener resultados generalistas para el gran abanico de vehículos que circulan por nuestras ciudades. Se propone por tanto el análisis experimental de la inestabilidad de una muestra significativa de modelos de vehículos a escala y que cumpliendo rigurosamente la semejanza de Froude, puedan ser escalados los resultados a prototipo. Se ha realizado el análisis del sistema de fuerzas actuantes sobre un vehículo situado en un flujo de agua, y se han llevado a cabo experimentos para determinar el umbral de inestabilidad de los vehículos envueltos en situaciones de inundación, analizando la sensibilidad de los resultados para diferentes orientaciones del flujo.

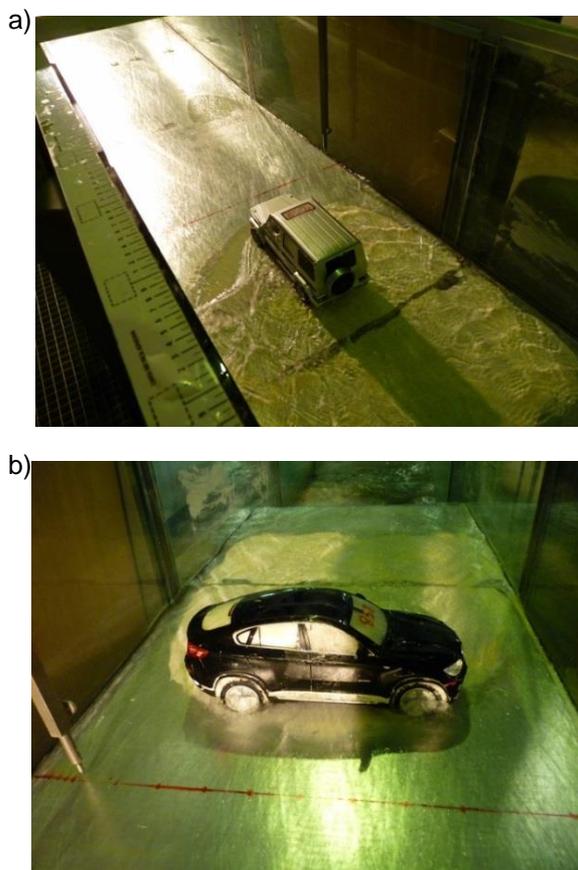


Figura 2. Ejemplo de ensayos con vehículo a) Mercedes G55 AMG ($e=1:14$) en posición paralela al flujo y b) BMW X6 ($e=1:14$) en posición perpendicular al flujo

Referencias.

[1] Shand, T. D., Cox, R. J., Blacka, M. J., and Smith, G. P., "Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles (Report Number: P10/S2/020)," 2011.

[2] Teo, F. Y., "Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions," PhD Thesis. Cardiff University, Cardiff, 2010.

[3] Keller R.J. and Mitsch B., "Safety Aspects of the Design of Roadways as Floodways, Research Report No. 69," 1993.

Metodología para determinar el campo de velocidades en los imbornales de captación

Jackson Téllez⁽¹⁾, Manuel Gómez⁽¹⁾, Beniamino Russo⁽²⁾

⁽¹⁾ *Instituto FLUMEN – UPC*

⁽²⁾ *Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA)*

Debido a los impactos de las inundaciones en áreas urbanas, en términos de daños económicos, consecuencias sociales, e incluso pérdida de vidas humanas, en los últimos años, la comunidad científica está esforzándose en entender con más rigor que en épocas pasadas, los procesos hidráulicos que ocurren a través de los elementos de captación de la escorrentía superficial en el marco del drenaje urbano [1], [2], [3]. En particular, un mal funcionamiento de los elementos de captación superficial (imbornales) puede llegar a tener consecuencias muy graves durante un evento de lluvia extrema ocasionando perjuicios sobre el tránsito de vehículos y de los peatones en zonas urbanas y peri-urbanas [4], [5].

Un logro importante en la ingeniería hidráulica ha sido la propuesta y el desarrollo de nuevas técnicas para la medición del campo de las velocidades de campo en problemas hidráulicos. Los avances tecnológicos en cámaras digitales con alta resolución y alta velocidad siempre más habituales en el mercado, y los avances en las técnicas de procesamiento de imágenes digitales ofrecen ahora un gran potencial para medir y estudiar el comportamiento de los flujos superficiales de agua [6], [7], [8], [9].

El objetivo del presente trabajo es conocer el comportamiento hidráulico de una reja de alcantarillado frente a diferentes configuraciones geométricas de calles y distintos caudales circulantes. Para eso se ensayó una reja tipo en una plataforma a escala real, haciendo circular diferentes caudales y variando la pendiente longitudinal y transversal de la misma plataforma.

Las dimensiones de la plataforma son de 5,5 m de largo por 4 m de ancho con una zona de ensayo útil de una franja de 1.5 m de largo por 3 m ancho cerca del imbornal aproximadamente, donde el ancho es similar al de la vía urbana. Además la plataforma es capaz de modificar sus pendientes longitudinales de 0% a 10% y su pendiente transversal de 0% a 4%. Al mismo tiempo cuenta con un máximo caudal de ensayo alcanzable de 200 l/s.

A través de las instalaciones del modelo se midió, en cada caso, el caudal captado por la reja, y una serie de calados en proximidad de la reja.

Dicho resultados fueron obtenidos en la Plataforma para el ensayo de Imbornales ubicada en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña y en particular por un grupo de trabajo del Instituto de Investigación Flumen.

En particular, para obtener los campos de velocidades se utilizó una cámara de alta resolución de 1280 x 1024 píxeles con una velocidad máxima de 488 fotogramas por segundo (figura 1). Las imágenes fueron tomadas en las zonas próximas al imbornal de captación (figura 2). La cámara fue colocada a una altura de 4 m por encima de la plataforma de imbornales.



Figura 1. Camara de alta resolucion y PC de gran capacidad.



Figura 2. Plataforma de Imbornales y area de ensayo experimental

Finalmente, para conocer el campo de velocidades del flujo sobre la calzada en inmediaciones del sumidero se trabajó en el procesamiento digital de imágenes con una cámara de alta resolución. Las imágenes se analizaron a través del software *DigiFlow* [10] y un código desarrollado en *MatLab*. El resultado final fue la obtención de los patrones del flujo alrededor del sumidero y la estimación de los caudales frontales y laterales de entrada al mismo (figura 3 y figura 4).



Figura 3. Campo de velocidades (caudal=200 l/s; pend. trans. = 0% y pend. long. =2%)

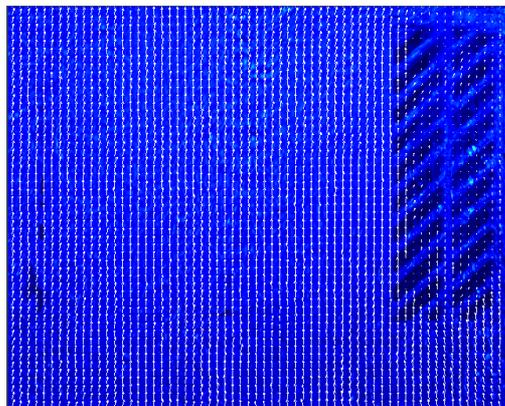


Figura 4. Campo de velocidades (caudal=150 l/s; pend. trans. = 2% y pend. long. =8%)

Referencias.

- [1] B. Russo, M. Gómez, and J. Tellez, "Methodology to Estimate the Hydraulic Efficiency of Nontested Continuous Transverse Grates," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 139, no. 10, pp. 864–871, Oct. 2013.

- [2] J. D. Tellez Alvarez, "Estimación del campo de velocidades a través de la técnica de procesamiento de imágenes para experimentos de mecánica de Fluidos.," Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [3] B. Russo, M. Gómez, and J. Tellez, "Closure to 'Methodology to Estimate the Hydraulic Efficiency of Nontested Continuous Transverse Grates' by Beniamino Russo, Manuel Gómez, and Jackson Tellez," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 141, no. 5, p. 07014047, May 2015.
- [4] M. Gómez V., *Curso de hidrología urbana*, Primera Ed. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [5] B. Russo, *Design of Surface Drainage Systems According to Hazard Criteria Related to Flooding of Urban Areas*. Barcelona, España: Technical university of Catalonia, Spain - University of Calabria, Italy. 2009.
- [6] J. Tellez; M. Gomez; B. Russo and J.M. Redondo., "A simple measuring technique of surface flow velocity to analyze the behavior of velocity fields in hydraulic engineering applications." *Geophys. Res. Abstr. - EGU Gen. Assem. 2015*, vol. Vol. 17, 2015.
- [7] Jérôme Le Coz, Alexandre Hauet, Raphaël Le Boursicaud, Lionel Pénard, Laurent Bonnifait, Guillaume Dramais, Fabien Thollet, and I. B. "Estimating flood discharge using witness movies in post-flood hydrological surveys," *Geophys. Res. Abstr. - EGU Gen. Assem. 2015*, vol. Vol.17, 2015.
- [8] Paolo Tarolli, Massimo Prosdocimi, Giulia Sofia, and G. D. F. "Smartphones for post-event analysis: a low-cost and easily accessible approach for mapping natural hazards," *Geophys. Res. Abstr. - EGU Gen. Assem. 2015*, vol. Vol. 17, 2015.
- [9] Salvador Peña-Haro, Beat Lüthi, and T. P. "Using surface velocity measurements to analyse the influence of the roughness coefficient on river discharge calculations." *Geophys. Res. Abstr. - EGU Gen. Assem. 2015*, vol. Vol. 17, 2015.
- [10] R. P. Dalziel, *DigiFlow User Guide*, no. June. Cambridge, England: Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics (DAMTP) - University of Cambridge, 2012.

Validación numérico-experimental de tuberías con sección circular y ovoide

Manuel A. Regueiro, Juan Naves, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez, Jose Anta

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA, Universidade da Coruña

En el ámbito del proyecto “Desarrollo de tuberías ovoides para la mejora de la eficiencia de las redes de alcantarillado – OvalPipe” se pretende analizar una tipología de sección para conducciones con forma ovoide. Dentro de este proyecto el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) participa en las fases de definición geométrica de la sección ovoide y en la fase de validación experimental. A la hora de definir la sección de un tubo ovoide es posible reproducir una amplia variedad de formas mediante la concatenación de tres arcos de circunferencia definida a partir de tres variables: los radios superior e inferior (R y r) y la altura total (H) del ovoide. De la definición geométrica de la sección ovoide para sistemas unitarios se ha concluido que la forma óptima se obtiene para una relación $H/R = 3.5$ y $r/R = 0.5$. El objetivo de este trabajo es la validación experimental sobre las tipologías de conducción circular y ovoide. Para ello se ha simulado un fluido multifásico en un modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) sin sedimentos. Además a partir de la calibración del modelo numérico se compara la capacidad hidráulica de las secciones circular y ovoide con área equivalente. El código utilizado para las simulaciones es el CFX 13.0, incluido en el paquete ANSYS CFD.

Para simular un fluido multifásico se utiliza el modelo VOF (*Volume of Fluid*). Este modelo resuelve un único conjunto de ecuaciones de conservación para todas las fases, en este caso agua y aire, y calcula la fracción de volumen de cada una a lo largo del dominio (De Schepper *et al.*, 2008). Para poder aplicar este modelo se necesita tener definida una malla fina en la interfaz entre los fluidos, donde se producen los mayores gradientes de masa entre las fases (Ghorai y Nigam, 2006).

La malla de elementos finitos se constituye en su totalidad por hexaedros. Para poder ajustar los cálculos en el contorno de la tubería y en la interfaz entre agua y aire se han ajustado las dimensiones de los elementos en sección transversal. Por ello se precisa una malla distinta para cada caso de estudio. El

número de elementos en los que se divide la malla oscila entre los 2,5 y 3 millones de hexaedros.

Para la calibración del modelo se ha dispuesto de la serie de ensayos realizados en el Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidad de A Coruña. En estos ensayos se han medido perfiles de velocidad en la sección central en dos tipologías de conducción (circular y ovoide) con una longitud de 11 m y una pendiente de 0.2%. Los equipos de medida han sido un perfilador de velocidad DOP2000 y un velocímetro ADV Nortek Vectrino. La tubería circular tiene un diámetro nominal de 315 mm, mientras que las dimensiones de la tubería ovoide se descomponen en tres acuerdos circulares: un radio inferior de 55 mm, un radio superior de 110 mm y una altura total de 385 mm. A su vez, para la comparación hidráulica entre las secciones, se tiene una geometría circular de diámetro interior de 291 mm.

En los ensayos se establecieron las condiciones de flujo para calado normal y se analizaron los grados de llenado del 20%, 30%, 40% y 50% para cada una de las secciones. Con el modelo numérico se trata de reproducir dichas condiciones y se calibra en función de los resultados obtenidos con los equipos de medición. Para ello se comparan tanto los perfiles de velocidad en secciones intermedias (figura 1) como las tensiones de fondo. De la calibración del modelo CFD para un fluido multifásico (agua y aire) se tiene que el modelo VOF junto con un refinamiento de la malla en la interfaz y en los contornos de las tuberías es capaz de reproducir las condiciones teóricas definidas en los ensayos. Las tensiones de fondo obtenidas difieren de media un 6% respecto a las experimentales.

Por último, a partir del modelo calibrado se ha analizado el funcionamiento de las conducciones circular y ovoide para la misma área mojada, y se ha comparado su capacidad hidráulica. Los resultados de esta comparación muestran que para caudales bajos (condiciones de tiempo seco en redes de saneamiento) la velocidad media, el radio hidráulico y la tensión de arrastre calculados tanto en el modelo numérico como a partir de la formulación teórica son mayores en la tubería ovoide con respecto a la circular. Por ejemplo, para un grado de llenado del 15% de la sección ovoide se mejora un 10% la capacidad de arrastre respecto a la circular. Por lo tanto para estas condiciones de funcionamiento la sección ovoide tiene un mejor comportamiento frente a formación de biopelícula y arrastre de sedimentos. Este efecto cambia al superar el 30% de grado de llenado de las secciones, a partir del cual la

sección ovoide presenta una menor capacidad hidráulica y menor tensión de arrastre.

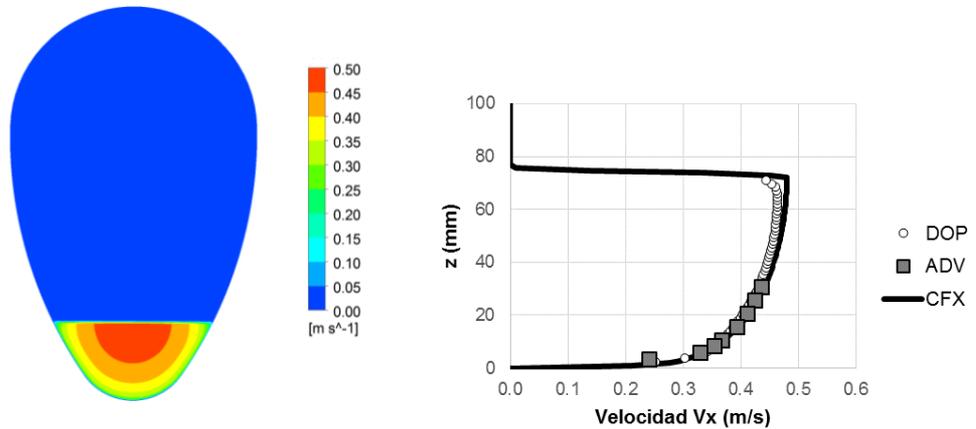


Figura 1. Campo de velocidades calculadas en modelo ANSYS CFD (izquierda) y comparación numérico-experimental del perfil de velocidades central (derecha) para un grado de llenado de la sección ovoide del 20%

Referencias bibliográficas.

De Schepper, S.C.K., Heynderickx, G.J., Marin, G.B. 2008. CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by Baker chart. *Chem. Eng. J.*, 138, 349-357. DOI: [10.1016/j.cej.2007.06.007](https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.007)

Ghorai, S., Nigam, K.D.P. 2006. CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow pipes. *Chem. Eng. Process.*, 45, 55-65. DOI: [10.1016/j.cep.2005.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.05.006)

Desarrollo de un modelo dual 1D/2D para el cálculo del drenaje urbano: modelo numérico y validación experimental

Ignacio Fraga, Luis Cea, Jerónimo Puertas

***Grupo de Enxeñería da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA).
Universidade de A Coruña.***

El modelo numérico presentado a continuación se enmarca dentro del proyecto MODUS (MOdelo de Drenaje Urbano Sostenible), financiado por la Xunta de Galicia. Dicho modelo está formado por dos modelos acoplados: un modelo bidimensional de flujo en superficie y un modelo unidimensional de flujo en colectores. Ambos modelos emplean un esquema de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones hidrodinámicas. El acoplamiento entre los modelos se realiza a través de sumideros, donde se permite un intercambio de masa bidireccional entre la superficie y la red de colectores.

El modelo de drenaje dual desarrollado se validó utilizando ensayos realizados sobre un segmento de calle construido a escala real en laboratorio. En dichos ensayos se midieron los calados en diferentes puntos de la superficie de la calle y los calados y caudales en la red de drenaje, tanto en lámina libre como en carga. Para medir los calados y caudales en la red de colectores se desarrolló una metodología no-intrusiva basada en el uso de velocímetros doppler de ultrasonidos.

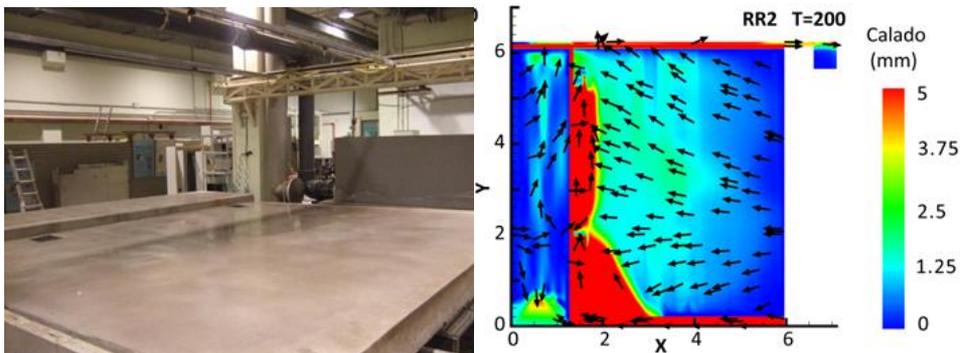


Figura 1. Fotografía del montaje experimental (izquierda) y ejemplo de resultados del modelo en uno de los ensayos (derecha)

El modelo validado se aplicó en una cuenca urbana en la localidad de Fene (situada en el Noroeste de España) de la que se dispone de datos experimentales de precipitación y caudales a la salida de la red de colectores. En primer lugar se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a diferentes parámetros de entrada mediante un análisis de las varianzas. Posteriormente, mediante la metodología GLUE, se calibraron los parámetros de entrada del modelo, acotando además intervalos de incertidumbre en los hidrogramas de salida calculados por el modelo.

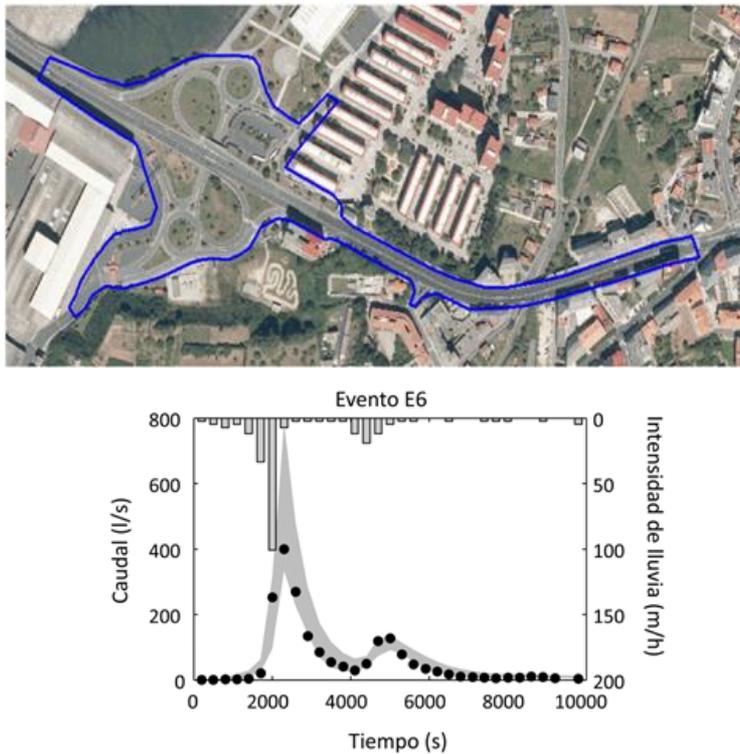


Figura 2. Extensión de la cuenca estudiada (izq.) y ejemplo de hidrograma calculado, mostrando los intervalos de confianza del 95% (línea gris) y los resultados experimentales (círculos negros)

Plataforma para el estudio del transporte de sedimentos en conducciones con agua residual urbana en la EDAR de A Coruña

Joaquín Suárez, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Juan Naves, Manuel A. Regueiro

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA, Universidade da Coruña

Para estudiar el fenómeno del transporte de sedimentos en tuberías de saneamiento se pueden emplear datos de secciones de control reales de redes de saneamiento para caracterizar la granulometría, la composición y el caudal sólido (ver entre otros Schellart, 2007 o Seco, 2014) o analizar el flujo a escala de laboratorio (ver p.ej. las revisiones realizadas en CIRIA, 1996 y en Banasiak y Tait, 2008). La principal ventaja de los ensayos realizados en laboratorio es el control sobre las variables que intervienen en el proceso. Sin embargo es habitual que los ensayos no recreen totalmente las condiciones de funcionamiento de las conducciones en las redes de saneamiento, empleando sedimentos granulares o cohesivos pero sin materia orgánica, biopelículas o sólidos gruesos. Para suplir esta deficiencia es necesario recurrir a campañas de campo y a la realización de medidas en redes de saneamiento reales en donde las condiciones no son predecibles. En definitiva, desde el conocimiento de los autores, en los principales estudios sobre el transporte de sedimentos en conducciones de saneamiento no se cuenta con instalaciones que permitan ensayar agua residual urbana bajo condiciones controladas, en donde se puedan combinar las ventajas del laboratorio y del trabajo en campo.

Con este objetivo se ha construido un banco de ensayos en la EDAR de Bens de la ciudad de A Coruña (600.000 habitantes equivalentes) que es capaz de utilizar el agua residual bruta previa al pretratamiento. Este tipo de instalación es de gran interés debido a su exclusividad y su gran potencial para el análisis del comportamiento de las conducciones de aguas residuales ante fenómenos como sedimentación, transporte de sólidos, capacidad de autolimpieza, agresiones químicas o formación de biopelícula en unas condiciones controladas. Este trabajo está incluido en el proyecto OvalPipe, en el que colabora el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de Universidade da Coruña, y en el que se pretende desarrollar una nueva serie

de conducciones con forma ovoide y en material plástico competitiva frente a los conductos circulares de diámetros comprendidos entre los 300 y 400 mm. La instalación se utiliza para el estudio y comparación del transporte y acumulación de sedimentos en tuberías de sección circular y ovoide utilizando agua residual urbana.

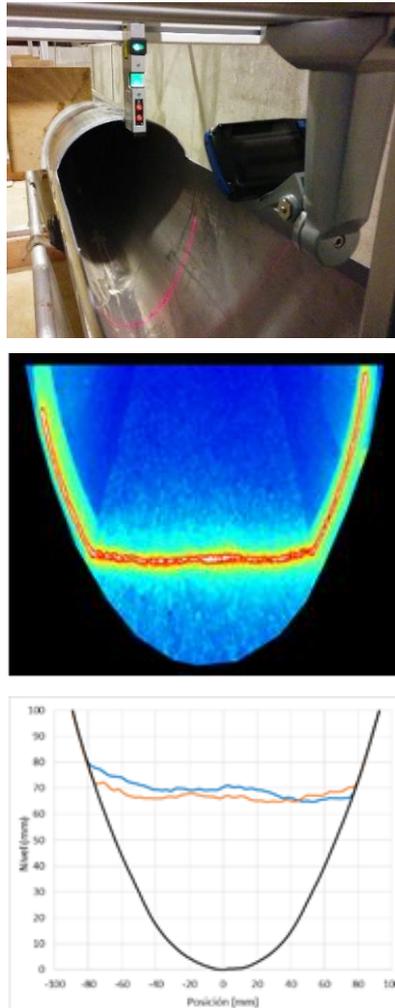


Figura 1. Montaje de cámara y láser para la obtención de imágenes (izquierda), imagen del haz láser obtenida (centro) y comparación con lecho inicial (derecha)

La plataforma de ensayos está situada en el edificio de pretratamiento de la EDAR y cuenta con una toma de agua bruta, desde el canal de entrada a las

rejas de desbaste y tamizado, que lleva el agua residual a una cámara de carga que actúa como dissipador de energía. El caudal, regulado mediante una válvula de tajadera y un aliviadero, entra en el banco de ensayos donde se instalan las tuberías de sección ovoide y circular que se van a estudiar. Aguas abajo existe una compuerta móvil que actúa de condición de contorno para regular el calado.

El banco de ensayos permite la medición y comparación de la acumulación de sedimentos en cada una de las conducciones para pendientes menores al 1% y para diferentes grados de llenado. Para ello se establecen caudales constantes y se registra la evolución del lecho de sedimentos a través de técnicas de medida que se han probado y calibrado en laboratorio como son barridos con sondas de ultrasonidos y la comparación de la posición de un plano láser transversal medida mediante el procesado de imágenes digitales (figura 1). Además es posible caracterizar el tipo de partículas que componen el lecho a partir de su densidad, contenido de materia orgánica, tamaño de grano medio y curva granulométrica.

En definitiva en este trabajo se prueba y se compara el funcionamiento de un prototipo de conducción de sección ovoide con una tubería circular equivalente con agua residual urbana, poniendo de manifiesto sus ventajas en cuanto a capacidad de autolimpieza en aguas bajas. Por otro lado se calibra y se pone en marcha una instalación singular que permite el desarrollo de distintas líneas de investigación que analicen en profundidad el fenómeno de transporte de sedimentos en redes de saneamiento con agua residual urbana.

Referencias bibliográficas.

Ackers, J., Butler, D., May, R.W.P. 1996. Design of sewers to control sediment problems. CIRIA. Report R141.

Banasiak, R., Tait, S. 2008. The reliability of sediment transport predictions in sewers: influence of hydraulic and morphological uncertainties. *Water Sci. Technol.*, 57(9), 1317-1327.

Schellart, A.N.A. 2007. Analysis of uncertainty in the sewer sediment transport predictions used for sewer management purposes. *PhD Thesis*. University of Sheffield.

Seco, R.I. 2014. Study of the release of sediments during wet-weather from combined sewer systems in the Mediterranean region in Spain. *PhD Thesis*. UPC. Barcelona.

LÍNEA PRIORITARIA D

SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Cuantificación numérica y experimental del flujo de aire arrastrado sobre la superficie libre de flujos supercríticos en conductos cerrados inclinados

Sarai Díaz, Javier González

Universidad de Castilla-La Mancha

El agua y el aire son los dos fluidos básicos que interaccionan en las obras hidráulicas por excelencia. En particular, su convivencia se hace especialmente interesante cuando se produce en espacios cerrados, donde la circulación de aire no es libre si no que se ve condicionada por los contornos que limitan el flujo. Este es el caso de los conductos cerrados en los que se desarrolla flujo en lámina libre, habituales en desagües de presa o canales soterrados (Novak et al., 2007). Estas obras hidráulicas son elementos clave en los que de hecho se suele disponer de algún medio de ventilación natural o artificial que facilite la entrada y movimiento de aire (Comité Nacional Español de Grandes Presas, 1997). Con esta idea, este trabajo se centra en cuantificar la circulación de aire que se produce en flujos supercríticos estratificados (de superficie lisa u ondulada) en conductos cerrados por encima de la superficie libre como resultado de las tensiones tangenciales existentes entre los fluidos. Debe mencionarse que el flujo en lámina libre también puede llevar a la aparición de burbujas o incluso la entrada en carga del conducto, pero este trabajo se centra en cuantificar el aire arrastrado sobre la superficie, que por otro lado es el componente de mayor repercusión.

En lo que respecta al arrastre de aire sobre la superficie libre en estas condiciones, debe llamarse la atención sobre el limitado conocimiento existente hoy día en este respecto. El motivo fundamental es la dificultad para medir el flujo de aire experimentalmente, pues se ve afectado con facilidad por los propios instrumentos de medida, los cuales condicionan el flujo (Maliska et al., 2008). De esta forma, la práctica tradicional consiste en emplear aproximaciones analíticas que parten de asunciones groseras para dar una idea de la magnitud del problema (Sikora, 1965; Falvey, 1980; Chanson, 1992, 1996). Ante esta situación, merece la pena destacar el potencial de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*) para su aplicación en este tipo de situaciones. Por limitar el coste computacional asociado y poder así obtener resultados en un tiempo

razonable, en el presente trabajo se opta por simular numéricamente un conducto de metacrilato de 20 cm x 20 cm de sección transversal interior, 8 m de longitud y 1% de pendiente, a caballo entre la escala propia de aplicaciones CFD y el campo de la Ingeniería Civil (Díaz and González, 2014). Con el objeto de probar la calidad del modelo numérico, y puesto que pueden encontrarse incoherencias fruto de los modelos físicos implementados numéricamente (Ho and Riddete, 2010; Meireles et al., 2014), se trabaja además con un modelo físico que reproduce esta realidad, desarrollándose también una metodología propia que integra las aproximaciones analíticas tradicionales antes citadas, permitiendo estimar la demanda de la estructura en vez de la demanda requerida en cada sección.

Comenzando con el montaje experimental, y gracias al empleo de un caudalímetro de aire másico térmico instalado en una chimenea de aducción de PVC de 80 mm de diámetro interior, se miden los caudales de aire requeridos para los distintos escenarios de flujo considerados. Esta primera aproximación permite identificar una tendencia creciente de la demanda a medida que disminuye la apertura de compuerta, puesto que se trata cada vez de flujos más rápidos que transfieren una mayor cantidad de movimiento al aire, movilizándolo más intensamente. Aunque existe un cierto error en la medida debido a las particularidades propias de la construcción del modelo (ligero lanzamiento del chorro tras flujo bajo compuerta, fugas de agua, etc.), esta estimación constituye una referencia sólida para el resto de las aproximaciones planteadas.

En lo que respecta al modelo CFD, se trabaja con una geometría que reproduce exactamente la realidad del laboratorio, probándose tres escenarios únicamente debido al coste computacional de cada simulación. En este modelo, las condiciones de contorno siguen un esquema velocidad-presión y permiten estimar la cantidad de aire movilizado sobre la superficie del agua asumiendo presión atmosférica en el exterior. El modelo de turbulencia adoptado es el $k-\epsilon$ con funciones de pared escalables y la simplificación multifase que se emplea es el modelo homogéneo de Ansys CFX v 12.0. La calidad de los resultados no es brillante debido al mallado empleado, que resulta más bien pobre. Esta simplificación se debe al elevado coste computacional asociado a las simulaciones (1 semana tiempo CPU), por lo que para suplir esta carencia de recursos se lleva a cabo una prueba de independencia del mallado parcial (en la zona crítica) para probar que no se produce una alteración significativa en términos de flujo de aire. No obstante, esta aproximación numérica, que no tiene en cuenta las complicaciones

propias de una observación real (fugas, pérdidas o alteraciones del flujo debido a efectos locales), proporciona un orden de magnitud razonable (del orden de cientos de m³/h) para la demanda de aire requerida por el conducto objeto de estudio, si bien es cierto que se queda en una aproximación teórica muy del lado de la seguridad.

Por su parte, la metodología desarrollada en este trabajo para la estimación de los caudales de aire se fundamenta en principios básicos, como son la estimación de tensiones tangenciales agua-aire y aire-paredes en base a expresiones propias de la hidráulica de canales en lámina libre y la posterior ejecución de un balance de cantidad de movimiento para estimar la demanda real de la estructura a partir de los requerimientos de cada sección, dados por las fórmulas tradicionales. Aunque son muchas las asunciones realizadas a lo largo de esta propuesta, los principales puntos débiles están asociados a la estimación de la distancia analítica a partir de la cual comienza a producirse la emulsión y los coeficientes de pérdidas locales y continuas que se producen cuando se trata de aire. La realización de un análisis de sensibilidad para estos últimos parámetros hace tambalearse las expresiones teóricas frecuentemente adoptadas (Falvey, 1980; Chanson, 1996), ya que si se adopta la velocidad media del aire como la mitad de la velocidad superficial del agua se obtienen valores por debajo de los medidos experimentalmente en los escenarios de caudal máximo.

Con todo, este trabajo pone de manifiesto que no es inmediato aplicar los conocimientos de la hidráulica convencional a casos en los que el flujo de aire tiene una importancia trascendental, existiendo diferencias entre las tres aproximaciones adoptadas para cuantificar el fenómeno de la aireación, especialmente con respecto al modelo numérico. Por ello, y debido a la relevancia de la aireación en muchas y muy importantes obras hidráulicas, se recomienda adoptar procedimientos que se mantengan ampliamente del lado de la seguridad en el dimensionamiento de la aducción, lo cual pone de manifiesto el interés de continuar desarrollando modelos numéricos adicionales y perfeccionando las propuestas analíticas hoy existentes.

Referencias bibliográficas.

Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C. and Narayanan, R. 2007. Hydraulic structures, Fourth edition. Taylor & Francis, Abingdon, Reino Unido.

Comité Nacional Español de Grandes Presas. 1997. Guías Técnicas de Seguridad de Presas (nº5): Aliviaderos y desagües.

Maliska, C., Silva, A., Rezende, R. and Georg, I. 2008. Interface forces calculation for multiphase flow simulation. *1º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico Líquido-Gás*.

Sikora, A. 1965. Zavdusnenie Sachtovych Priepadov. Prace a studie 211, Vyskumny Ustav Vodohospodarsky, Bratislava, Eslovaquia.

Falvey, H.T. 1980. Air-water flow in hydraulic structures. Engineering monograph No. 41, U.S. Water and Power Resources Service, Denver, Colorado.

Chanson, H. 1992. Air entrainment in chute and tunnel spillways. *11th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 1:83-86.

Chanson, H. 1996. Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows. Academic Press, Bath, Reino Unido.

Díaz, S. and González, J. Airflow computation in partially filled conduits using CFD. *3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*.

Ho, D. and Riddete, K. 2010. Application of computational fluid Dynamics to evaluate hydraulic performance of spillways in Australia. *Australian Journal of Civil Engineering*, 6(1):81-104.

Meireles, I., Silva, S., Viseu, T. and Sousa, V. 2014. Experimental and numerical study of water intakes: case study of the Foz Tua hydropower plant. *3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*.

Estudio numérico y experimental de los efectos hidráulicos asociados a la colocación de una compuerta inflable sobre un aliviadero de presa

Sarai Díaz, Javier González

Universidad de Castilla-La Mancha

Las compuertas inflables son estructuras de interés en el ámbito de la ingeniería hidráulica principalmente debido a su comportamiento flexible, que les permite adaptarse a distintas condiciones de flujo y además facilita su construcción, colocación y operación (Cheraghi-Shirazi et al., 2014). Se construyen con algún tipo de tejido cauchutado, que queda anclado típicamente a una base de hormigón para luego ser inflado con aire o agua, adquiriendo la forma de un cilindro (Tam, 1997). No se corroen y además suelen resultar más económicas que las estructuras de control de acero u hormigón (Zhang et al., 2002). Tradicionalmente, se han colocado en ríos y estuarios con el objeto de permitir la derivación de agua y/o favorecer su acumulación para diferentes usos, así como para contribuir al control de avenidas o a la regulación de sedimentos, entre otras aplicaciones (Watson et al., 1999). Debido a la versatilidad derivada de su flexibilidad y su simplicidad de operación, también se han comenzado a emplear como compuertas en aliviaderos de presa, permitiendo incrementar y regular el almacenamiento en el embalse (Khatsuria, 2004). En este respecto, se han desarrollado numerosos estudios para caracterizar las solicitaciones a las que se ve sometida la compuerta inflable (Anwar, 1967; Alwan, 1979; Al-Shami, 1983; Chanson, 1997; Chanson, 1998; Alhamati et al., 2005; etc.), pero apenas se ha prestado atención al efecto que esto supone en la estructura preexistente, de fuerte curvatura y sometida a elevadas velocidades, propias de vertederos de presa. Así pues, el objetivo de este estudio es analizar los efectos hidráulicos asociados a la colocación de una compuerta inflable (inflada con aire) con una sola línea de anclaje sobre un perfil de aliviadero. Para ello, se desarrollan un modelo experimental y otro numérico de un perfil WES original, en el cual se valorarán luego los efectos asociados a la colocación de la compuerta inflable en términos de presiones sobre el paramento y coeficientes de descarga.

El modelo experimental consiste en una reproducción a escala de la realidad de la presa. En concreto, se reproduce la realidad de un solo vano, sobre el

que se coloca una compuerta inflable de EPDM de 0,4 mm de espesor, así como un recrecimiento lateral para reproducir la posibilidad de entrada de aire, que queda garantizada en el prototipo gracias a la presencia de las pilas. El control de las presiones sobre el paramento se realiza por medio de dispositivos de medida de presión colocados en la parte central del aliviadero y en las proximidades de su cresta, mientras que el coeficiente de descarga del vertedero se evalúa como si se tratase de un vertedero de labio fijo convencional, cuyo umbral de vertido varía en función del nivel de inflado de la compuerta. En este respecto, se reproduce el flujo sobre el aliviadero en su estado original (desnudo) y una vez colocada la compuerta, concretamente en su posición completamente desinflada e inflada al 25, 50, 75 y 100%. Cada uno de estos escenarios se someten a diferentes niveles de sobrevertido establecidos en función de la regla de operación asumida, cuyo objetivo es en este caso mantener el nivel al máximo en el embalse sin comprometer la respuesta de la presa en caso de avenida.

El modelo numérico es un modelo basado en la dinámica computacional de fluidos (CFD, del inglés Computational Fluid Dynamics), que se presenta en los últimos años como una herramienta complementaria para el análisis de distintos problemas de flujo (Feurich and Olsen, 2012; Andersson et al., 2013; Soares et al., 2013; Cheraghi-Shirazi et al., 2014; entre otros). En concreto, en este caso de estudio el interés radica en simular numéricamente la realidad de la presa a escala real, permitiendo contrastar los resultados experimentales, que podrían verse sujetos a efectos de escala. En lo que respecta al modelo numérico en sí, se adopta el modelo multifase homogéneo implementado en Ansys CFX v 12.0, combinado con un esquema compresivo para mejorar la definición del contacto agua-aire, así como un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ con funciones de pared escalables. La geometría adoptada en el modelo numérico se adapta a tres de los escenarios reproducidos en el modelo experimental: el aliviadero en su situación original, la compuerta desinflada y la compuerta totalmente inflada, que se simplifican modelizando una única rebanada (2D). Para la discretización se emplea un mallado hexaédrico de tamaño de celda variable que permite delimitar con éxito los elementos curvos que definen el dominio. Por otro lado, se fijan condiciones de contorno definidas en presión aguas arriba de la presa y una salida supercrítica aguas abajo, permitiéndose la entrada y salida de aire por la parte superior a presión atmosférica, tal y como sucede en un flujo en lámina libre real. Por su parte, se adopta un esquema de alta resolución para la discretización.

Los resultados numéricos y experimentales son razonablemente similares entre sí teniendo en cuenta las simplificaciones adoptadas en el modelo numérico. Además, los resultados permiten detectar variaciones significativas en la distribución de presiones a lo largo del aliviadero como resultado de la colocación de la compuerta, que no sólo varían en magnitud sino también en el tiempo cuando la compuerta se encuentra desinflada, pues se produce una agitación de la misma a partir de un cierto sobrevertido. La mencionada alteración comienza con la aparición de una bolsa de aire bajo la compuerta en las proximidades del anclaje, desplazándose luego en la dirección aguas abajo para terminar sacudiendo su extremo y comenzando así de nuevo el proceso. Por su parte, la presencia de la compuerta inflada no parece tener un efecto negativo sobre el aliviadero, y esto, unido a la tímida reducción que supone la colocación de la compuerta en términos de coeficiente de descarga, hace que se pueda concluir que la localización de esta compuerta particular tiene un efecto global positivo en la explotación de la presa, si bien es cierto que se requieren estudios adicionales para matizar los aspectos negativos identificados.

Referencias bibliográficas.

- Alhamati, A.A.N., Mohammed, T.A., Ghazali, A.H., Norzaie, J. and Al-Jumaily, K.K. 2005. Determination of coefficient of discharge for air-inflated dam using physical model. *Suranaree J. of Sci. and Tech.* 12(1), 19-27
- Al-Shami, A. 1983. Theory and design of inflatable structures. PhD thesis, University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom
- Alwan, A.D. 1979. The analysis and design of inflatable dams. PhD thesis, University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom
- Andersson, A.G., Andreasson, P. and Lundström, T.S. 2013. CFD-modelling and validation of free surface flow during spilling of reservoir in down-scale model. *Eng. Applications of Computational Fluids* 7(1), 159-167
- Anwar, H.O. 1967. Inflatable dams. *J. Hydraul. Div. – ASCE* 93 (HY3), 99-119
- Chanson, H. 1997. A review of the overflow of inflatable flexible membrane dams. *Australasian Civil/Structural Eng. Transactions CE* 39(2-3), 107-116
- Chanson, H. 1998. Hydraulics of rubber dam overflow: a simple design approach. 13th Australasian Fluid Mech. Conference, Melbourne, Australia, 225-258

Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A.R. and Boroomand, B. 2014. Numerical analysis of rubber dams using fluid-structure interactions. *Flow Measurement and Instrum.* 40, 91-98.

Feurich, R. and Olsen, N.B.R. 2012. Finding free surface of supercritical flows – numerical investigation. *Eng. Applications of Computational Fluid Mechanics* 6(2), 307-315.

Khaturia, R.M. 2004. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*, Ed. CRC Press, NY, pp. 41-62

Soares, C., Noriler, D., Maciel, M., Barros, A. and Meier, H. 2013. Verification and validation in CFD for a free-surface gas-liquid flow in channels. *Brazilian J. of Chem. Eng.* 30(2), 323-335

Tam, P.W.M. 1997. Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong. *J. Irrig. Drain Eng.* 123, 73-78

Watson, L.T., Suherman, S. and Plaut, R.H. 1999. Two-dimensional elastic analysis of equilibrium shapes of single-anchor inflatable dams. *Int. J. Solids and Structures* 36, 1383-1398

Zhang, X.Q., Tam, P.W.N. and Zheng, W. 2002. Construction, operation and maintenance of rubber dams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(3), 409-420.

Influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto LS-Emulsion

David López, Rubén Díaz, Juan José Rebollo

Laboratorio de Hidráulica. CEH. CEDEX

El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX está realizando actualmente una investigación sobre la influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto en el marco del proyecto EMULSIONA (Plan Nacional de I+D del MINECO), cuyo objeto es analizar y caracterizar estos efectos a gran escala.

Con el fin de analizar los efectos de la aireación en condiciones de prototipo se ha construido en el Laboratorio de hidráulica del CEDEX una instalación con una rápida de 6 m de altura y un cuenco de amortiguamiento de 9 m de largo y 2 m de altura. La instalación se alimenta con un sistema de bombeo que permite alimentar un caudal de 400 l/s, con 10 m de altura de carga en la sección de entrada de la rápida. En esta sección se ha dispuesto una boquilla que permite regular el calado entre 2 y 20 cm. Esto permite disponer de velocidades en la sección de entrada entre 3 y 20 m/s. El dispositivo experimental consta además de un compresor de aire de 8 bares que permite alimentar caudales de hasta 10.000 l/min de aire.

Los principales equipos de medida y caracterización del flujo están formados por un tubo Pitot de fabricación propia, que toma una muestra de flujo emulsionado de forma continua y la conduce a un depósito de decantación en el que se separa y afora el caudal de aire y agua. La velocidad del flujo en la rápida se ha realizado con el mismo tubo Pitot, que se encuentra conectado a un sensor de presión que proporciona el término cinético de la altura de energía. Para ayudar a caracterizar el resalto se ha dispuesto en la solera del cuenco 9 sensores de presión rápidamente variable. Estos sensores están conectados a un sistema de adquisición de datos que permite registrar 500 muestras por segundo en cada canal. Por último, todas estas mediciones se completan con la medida del perfil de velocidad aguas abajo del resalto mediante una sonda ADV.



Figura 1. Sistema de medida de velocidad y concentración de aire.

La primera fase de la investigación se ha centrado en el estudio de la influencia de la aireación en las rápidas, donde se intenta evaluar la pérdida de energía para conocer la velocidad de entrega al final de la misma y así dimensionar la estructura de disipación necesaria. Analizando el estado del arte sobre esta temática, se mencionan diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en rápidas:

- Frenado por fricción de contornos.
- Disipación turbulenta
- Disipación por efecto la división y reagrupamiento de las burbujas

Los efectos de la aireación en el primer mecanismo son contrapuestos a los restantes. En el flujo en rápida, con láminas de poca entidad debido a la velocidad, parece que la fricción será preponderante, mientras que en el resalto tiene mucho más importancia la turbulencia.

Se han realizado ensayos en condiciones próximas a las de prototipo con velocidades entre 9 y 20 m/s y calado entre 4 y 20 cm y concentraciones de

aire en agua entre 0 y 80%. Se ha medido la velocidad al inicio y al final de la rápida. En todos los casos estudiados se ha comprobado una reducción de las pérdidas por fricción con la concentración, lo que concuerda con Mateos (1987).

La segunda parte de la investigación se centra en la influencia de la aireación en el resalto. Las formulaciones tradicionales del calado conjugado en el resalto hidráulico se han obtenido considerando el balance de fuerzas en un volumen fluido que contiene el resalto, considerando que el empuje hidrostático del agua y la impulsión en las secciones extremas del volumen de control se deben equilibrar con las fuerzas externas (despreciables). De este modo se obtiene la tradicional formulación del calado conjugado de Bélanger (1841).

Se han realizado ensayos con números de Froude del flujo de entrada entre 8 y 16 y concentraciones de aire en el flujo de entrada entre 0 y 70%. El número de Reynolds en los ensayos queda entre 800,000 y 2,000,000 y el de Weber entre 137 y 1,050. En todos los casos estudiados los calados conjugados son inferiores a los proporcionados por la fórmula de Bélanger, aunque este efecto es más claro a partir de números de Froude de 10.



Figura 2. Resalto hidráulico. $Q_{\text{agua}}=100$ l. A) $F_1=11.1$ $C=0\%$. B) $F_1=12.0$ $C=33\%$; C) $F_1=13.0$ $C=67\%$

Rajaratnam (1965) propuso una modificación al considerar la fuerza de fricción con el contorno, Chanson (2009), despreciando los efectos de la fricción,

propuso una nueva formulación donde se considera de un modo global los efectos de la aireación en un coeficiente que depende de la concentración.

Habitualmente se desprecia la fuerza debida al intercambio de la cantidad de movimiento a través de la superficie libre. Esto parece adecuado en un flujo normal en canal. Sin embargo, en un resalto debido a la gran turbulencia existente este fenómeno tiene mayor importancia. Por tanto se ha incluido una fuerza exterior que engloba este efecto en el balance de fuerzas de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. Aunque no se ha terminado la fase experimental, ya pueden adelantarse algunos resultados. Se ha comprobado que esta fuerza es mayor cuanto mayor sea el número de Froude, y por tanto menor es el calado conjugado necesario. En lo referente a la longitud del resalto se aprecia una dependencia respecto de la concentración de aire. Esto se explica por el aumento de la turbulencia que introduce la aireación, reduciendo la longitud necesaria para estabilizar el resalto.

Agradecimientos.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Estudio de la aireación natural y forzada en modelo físico de grandes dimensiones y análisis de su influencia en el funcionamiento de los cuencos de resalto hidráulico (LS-EMULSION)" (BIA2011-28756-C03-03), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la UE.

Referencias.

Bélanger, J.B. (1841). Notes sur l'Hydraulique. École Royale des Ponts et Chaussées, Paris (France). Session 1841-1842, p. 223.

Chanson, H. (2009). Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 3, pp. 159–163 doi 10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(159).

Hinze, J. O. & VAN DER HEGGE ZIJNEN, B. G. (1949). Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet. Appl. Sci. Res. A 1, 435461.

Mateos C. (1987). Aireación y cavitación en obras de desagüe. Curso sobre comportamiento hidráulico de estructuras de desagüe en presas. CEDEX.

Rajaratnam (1965). "The Hydraulic Jump as a Wall Jet". Proc. ASCE, Hy., Sept.

Análisis preliminar de resaltos hidráulicos a partir de flujos supercríticos emulsionados. Aplicación a la adaptación de cuencos amortiguadores

Francisco J. Vallés, Juan Marco

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València

En España, según datos oficiales del MARM, más del 80 % de las presas existentes son anteriores a 1990. Por tanto, fueron construidas con anterioridad al Reglamento Técnico de 1996 y diseñadas según la Instrucción del 67. La normativa en estudio (NTS segundo borrador, julio 2011), las recomendaciones técnicas actuales, y la sociedad, demandan nuevos estándares de seguridad para nuestras presas lo que sin duda conlleva su adaptación para el alivio de crecidas de mayor periodo de retorno. La investigación que se está llevando a cabo plantea la aireación forzada del flujo en la rápida mediante 'aireadores' – especialmente dispuestos- para la mejora del comportamiento hidráulico del cuenco. Se aumenta así su rango de utilización posibilitando su correcto funcionamiento hidráulico para mayores caudales de proyecto o para condiciones hidráulicas más exigentes. La aireación se concibe así no sólo para evitar los problemas de cavitación en la rápida sino también para mejorar el funcionamiento y el rendimiento disipativo del resalto hidráulico en el cuenco. El trabajo aborda, a partir de la evidencia empírica, tanto la justificación teórica de la idea como el detalle práctico de la aplicación, pasando por la presentación de los primeros resultados experimentales.

Entre los resultados estudiados se encuentran la relación de calados conjugados y la longitud de resalto. La concentración de aire en el flujo provoca una reducción de la relación de calados conjugados (figura 1). Al mismo tiempo, la longitud de resalto parece acortarse respecto a los resultados previos con resaltos hidráulicos no aireados. Este hecho último parece hacerse tanto más significativo cuanto mayor es la concentración de aire del flujo supercrítico de aguas arriba. En cualquier caso, se hace necesaria una campaña experimental más extensa y a mayor escala que la realizada hasta el momento, para poder concluir al respecto.

A partir del conocimiento adquirido, se ha diseñado y construido un nuevo canal en el laboratorio, el Canal Emulsiona 2. Su diseño se ha basado tanto en

el canal precedente -canal de pequeña escala- como en las recomendaciones de la literatura técnica internacional en cuanto a la no aparición de efectos de escala en los ensayos con flujos aireados (Heller, 2011). Así, este nuevo canal, horizontal, de sección rectangular de 0.3 m de ancho y 1 m de alto, con 10 m de longitud (figura 2), permite realizar ensayos con números de Weber por encima de 110 (Rutschmann, 1988) y números de Reynolds superiores en todo caso a 105 (Chanson, 2009) para calados del régimen supercrítico mayores a 4 cm. El caudal máximo en flujo líquido es de 140 l/s mientras que el de aire es de 90 l/s.

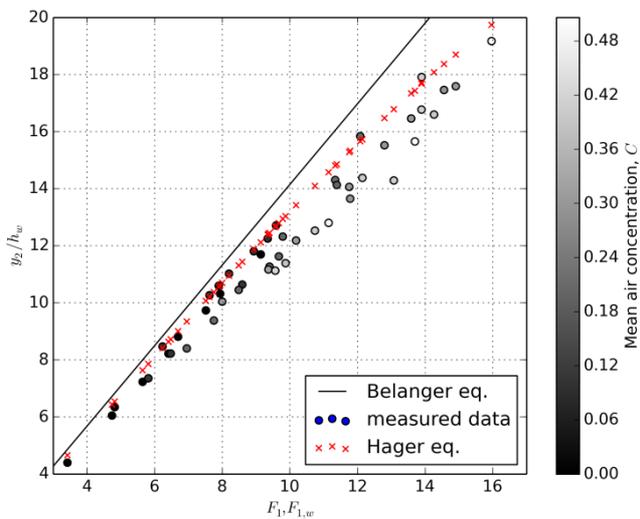


Figura 1. Relación de calados conjugados para los ensayos realizados



Figura 2. Canal Emulsiona 2. Detalle del dispositivo de alimentación (izda.) y vista general del canal de ensayos (dcha.)

El objetivo final de la campaña de ensayos es la completa caracterización de los resaltos hidráulicos generados a partir de flujos supercríticos emulsionados.

La investigación se desarrolla en el seno del proyecto EMULSIONA (Plan Nacional I+D. MINECO, Convocatoria 2011).