

Retos actuales en la caracterización de los flujos agua-aire en grandes obras hidráulicas

Current challenges in the characterization of air-water flows in large hydraulic structures

(Recepción 11/12/2016; Aceptación 10/02/2017)

Valero, D.^{1,2}

¹ FH Aachen, University of Applied Sciences, Hydraulic Engineering Section (HES), Bayernallee 9, Aquisgrán 52066, Alemania

² University of Liège (ULg), Hydraulics in Environmental and Civil Engineering (HECE), Chemin des Chevreuils 1, Bat B52/3 +1, Lieja, Bélgica
Teléfono: +49 241 6009 51180
Email: valero@fh-aachen.de

Resumen. En este estudio se analizan brevemente los retos actuales en la descripción y modelización de los flujos agua-aire. Se analizan los estudios publicados durante los últimos cuatro años en cinco de las principales revistas internacionales y se discuten los principales avances en los temas con mayor producción científica. Los temas de mayor interés son: aliviaderos escalonados, burbujas en flujos a presión, modelación numérica e instrumentación.

Palabras clave. Aliviaderos escalonados; golpe de ariete; instrumentación; modelación numérica; aireación.

Abstract. Present literature on air-water flows is briefly reviewed, including articles of the main five international Journals published along the last four years. Main advances in the most fruitful topics related to air entrainment are discussed. Main areas of interest are: stepped spillways, bubbles in pipe flows, numerical modelling and instrumentation.

Keywords. Stepped spillways; water hammer; instrumentation; numerical modeling; self-aeration.

1. Introducción

El estudio de los flujos agua-aire en grandes obras hidráulicas empieza con las observaciones de Ehrenberger (1926). Desde entonces la conceptualización de los flujos agua-aire ha ido cambiando poco a poco, sin embargo, en muchos aspectos, el estudio de Straub & Anderson (1958) ya estableció muchos de los conceptos que todavía son ampliamente aceptados. El interés de los investigadores ha ido *in crescendo* y ahora son muchos los retos que se presentan a la comunidad científica.

El trabajo experimental y teórico de Killen (1968), el experimental de Cain (1978) a escala de prototipo, la formulación de Woods et al. (1983), acompañado de la monografía de la IAHR de Woods (1991) establecieron unas sólidas bases para esta disciplina. Hacia finales de los años 90 y principios del nuevo siglo, los trabajos del Prof. Chanson —entre otros Chanson (1997), Chanson & Brattberg (2000) y Chanson & Toombes (2002)—, introducen extensas bases de datos experimentales y vislumbran los primeros trabajos sobre evaluación de las propiedades turbulentas en flujos altamente aireados.

Recientemente, Chanson (2013) presentó un *vision paper* sobre los últimos trabajos publicados. Sin embargo, en los últimos 3-4 años se han presentado numerosos trabajos. En este artículo se analizan sucintamente los trabajos publicados en las

principales revistas internacionales durante los últimos cuatro años y se analizan los principales subtemas tratados.

2. Producción científica

En este trabajo se han analizado las publicaciones realizadas durante el periodo enero 2013 – octubre 2016 de las siguientes revistas: *Journal of Hydraulic Research* (JHR), *Journal of Hydraulic Engineering* (JHE), *Environmental Fluid Mechanics* (EFM), *International Journal of Multiphase Flows* (IJMF) y *Experiments in Fluids* (ExpF); con un total de 121 artículos, incluyendo discusiones pero no correcciones de errores (*erratum*).

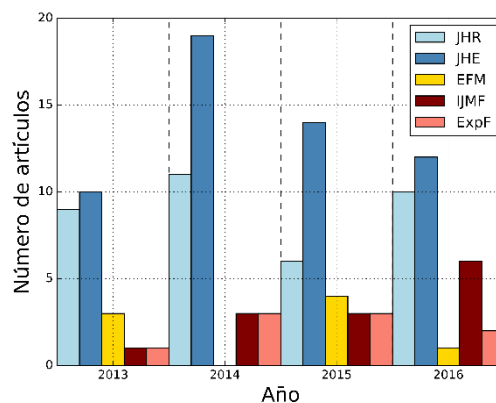


Figura 1. Producción científica sobre flujos agua-aire con implicaciones en ingeniería civil en las principales revistas.



Estas revistas internacionales han sido seleccionadas en base a su impacto, continuidad y gran número de aportaciones significativas durante las últimas décadas. Sin embargo, y tal y como es evidente, otras revistas existen con contribuciones de relevancia. Dentro de los artículos publicados en IJMF, se han filtrado aquellos que, a pesar de tratar temas relacionados con flujos multifase, no tienen una conexión directa con la ingeniería civil (e.g.: ingeniería química o nuclear).

En la Fig. 1 se observa claramente que son JHE y JHR las dos revistas con mayor cantidad de artículos. Además, la temática de estas dos revistas es bastante transversal. EFM, IJMF y ExpF se mantienen en un segundo plano con una temática más especializada.

3. Retos actuales

En base a los artículos seleccionados, se pueden distinguir varias líneas prioritarias de investigación.

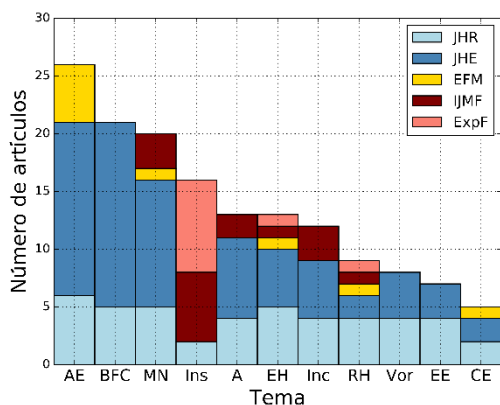


Figura 2. Distribución de trabajos publicados por temática (ver Tabla 1).

Tabla 1. Códigos de las temáticas presentadas en la Fig. 2.

	Descripción
AE	Aliviaderos escalonados.
BFC	Burbujas en flujos confinados.
MN	Modelación numérica.
Ins	Instrumentación.
A	Aireadores, deflectores, trampolines, etc.
EH	Otras obras hidráulicas.
Inc	Determinación del inicio de aireación.
RH	Resalto hidráulico.
Vor	Vórtices.
EE	Efectos de escala.
CE	Chorros y erosión.

3.1. Aliviaderos escalonados (AE)

Los aliviaderos escalonados acaparan el mayor número de artículos publicados en los últimos 4 años. Recientemente, la atención se ha centrado en la zona no aireada y en la determinación del punto de inicio

de la aireación. La determinación de criterios sencillos de diseño y las propiedades turbulentas del flujo aireado son otros de los subtemas más tratados. Sin embargo, y a efectos prácticos, se trata de un subtema que parece haber alcanzado la madurez (Chanson & Toombes 2002; Boes & Hager, 2003; Amador *et al.*, 2006; Pfister & Hager, 2011; Bung, 2011).

3.2. Burbujas en flujos confinados (BFC)

El movimiento de burbujas de aire en flujos a presión y sus implicaciones en el golpe de ariete son el segundo subtema más comúnmente encontrado en estas revistas. Existen, además, una gran cantidad de trabajos sobre burbujas en flujos confinados en el IJMF que, sin embargo, no se han tenido en cuenta en este análisis al estar más enfocados a otras disciplinas.

3.3. Modelación numérica (MN)

La modelación numérica de obras hidráulicas con flujos agua-aire aparece como un tema de actualidad. Sin embargo, los esfuerzos de los investigadores son muy dispersos, correspondiendo cada estudio a tipos de flujos distintos (e.g.: resalto hidráulico, golpe de ariete, aliviaderos escalonado, etc.).

La principal dificultad que aparece en la modelación de flujos aireados es la gran diferencia de escalas: por un lado, las que constituyen el flujo medio y, por otro, las involucradas en el proceso de aireación del flujo (Valero & García-Bartual, 2016).

3.4. Instrumentación (Ins)

Es el único tema que no tiene representación en el JHE. Además, parece que hay cierta preferencia por ExpF y IJMF, en lugar del JHR, siendo las únicas contribuciones en esta revista las de Bung (2013) y Bung & Valero (2016).

Los trabajos en instrumentación se centran bien en desarrollar nuevas metodologías o en reinterpretar técnicas comúnmente aplicadas. Las técnicas intrusivas siguen siendo las más comúnmente empleadas pero, cada vez más, ganan peso otros métodos como pueden ser los métodos ópticos.

En los flujos aireados, a diferencia de en los problemas analizados en la hidráulica clásica, los métodos basados en correlación cruzada han presentado grandes dificultades (Bung & Valero 2015) debido al resultante conflicto en el uso de haces de luz láser y la extremadamente grande densidad de “partículas” que aparecen y desaparecen o cambian completamente el patrón de reflexión de la luz en cada par de imágenes. Parece que esto se resuelve parcialmente usando técnicas basadas en Visión por Computadora (Bung & Valero, 2016), lo cual está levantando cierto interés en investigadores que tradicionalmente han optado por métodos intrusivos (Zhang & Chanson, 2017).

3.5. Aireadores (A)

Los aireadores, deflectores, trampolines y otras estructuras ubicadas en grandes presas, bien para airear o para romper el chorro, han dado lugar a un considerable número de publicaciones. El estudio de las trayectorias y del grado de aireación suelen ser los resultados más comúnmente tratados. Los trabajos sobre chorros y la consecuente erosión (CE) podrían estar en cierto modo relacionados, sin embargo, se han decidido incluir por separado.

3.6. Otras obras hidráulicas (EH)

Han sido comunes los estudios en otros tipos de obras hidráulicas donde la aireación puede tener lugar ocasionalmente. Entre ellos se encuentran los pozos de disipación, *roll waves* en aliviaderos y estudios en canales de gran pendiente. Destacan también algunos trabajos con carácter puramente generalista.

3.7. Determinación del punto crítico de reaireación (Inc)

Es de especial interés conocer bajo qué circunstancias tiene lugar la reaireación, tanto por sus efectos beneficiosos para la estructura (protección contra cavitación) como por sus efectos perjudiciales (vórtices en tomas de bombeo). La mayoría de estudios presentan relaciones experimentales, siendo escasos los trabajos de marcado carácter teórico (Valero & Bung, 2016; Meireles *et al.* 2014). Este sigue siendo uno de los grandes misterios sin resolver siendo posiblemente el tema que presenta las teorías más eclécticas.

3.8. Resalto hidráulico (RH)

Es destacable el reducido número de trabajos en resalto hidráulico, al menos en comparación con las pasadas décadas. La gran mayoría de los trabajos más recientes sobre resalto hidráulico se centran en la determinación de las escalas turbulenta haciendo uso de matrices de sensores sincronizados. Sin embargo, el estudio de la turbulencia en resaltos hidráulicos se inició hace varias décadas (Rouse *et al.*, 1958) y, probablemente, alcanzó su madurez con los trabajos de Long *et al.* (1991), Hager (1992) y Chanson & Brattberg (2000).

3.9. Vórtices (Vor)

Los estudios sobre vórtices recogen trabajos experimentales, numéricos, teóricos y sobre efectos de escala. Por lo tanto, no parece haber una preferencia en el estudio de este subtema.

3.10. Efectos de escala (EE)

Tal vez uno de los subtemas más importantes y de los menos tratados debido a su gran complejidad y a la dificultad de encontrar instalaciones por duplicado a distinta escala. El estudio de los efectos de escala se

convierte en necesario para conocer cómo los estudios sobre aireación son aplicables a escalas de prototipo. Los flujos aireados muestran mayor sensibilidad a la escala del modelo que otros tipos de estudios experimentales.

3.11. Chorros y erosión (CE)

Durante el vertido libre por coronación en presas se genera un chorro altamente energético que puede romper antes de impactar con la masa de agua inmediatamente aguas abajo. En este campo, son destacables los trabajos de Ervine *et al.* (1980) y Ervine & Falvey (1987) en la determinación de la rotura del chorro. Otros trabajos destacables enfocados a la determinación de los esfuerzos generados por el chorro y la potencial erosión se pueden encontrar en Bollaert & Schleiss (2003), Duarte *et al.* (2015) y Castillo *et al.* (2015).

Agradecimientos

El autor agradece al Dr. Carrillo (UPCT) por sus esfuerzos al promover esta iniciativa y así hacer posible esta nueva revista.

Referencias

- Amador, A., Sánchez-Juny, M., Dolz, J. (2006). "Characterization of the Non-aerated Flow Region in a Stepped Spillway by PIV". *J. Fluids Eng.* 128(6), 1266-1273. doi: 10.1115/1.2354529
- Boes, R. M., Hager, W. H. (2003). "Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways". *J. Hydr. Eng.* 129(9), 661-670. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661)
- Bollaert, E., Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review". *J. Hydr. Res.* 41(5), 451-464.
- Bung, D. B., (2011). "Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways". *J. Hydraul. Res.* 49(5), 639-648. doi: 10.1080/00221686.2011.584372
- Bung, D. B., (2013). "Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows". *J. Hydraul. Res.* 51 (3), 322-329. doi: 10.1080/00221686.2013.777373
- Bung, D. B., Valero, D. (2015). Image processing for bubble image velocimetry in self-aerated flows. 36th IAHR World Congress, The Hague.
- Bung, D. B., Valero, D., (2016). "Optical flow estimation in aerated flows". *J. Hydraul. Res.* 54 (5), 575-580. doi: 10.1080/00221686.2016.1173600
- Cain, P., (1978). "Measurements within self-aerated flow on a large spillway". Ph.D. thesis, University of Canterbury. Civil Engineering.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., Blázquez, A. (2015). "Plunge pool dynamic pressures: a temporal analysis in the nappe flow case". *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118.



Chanson, H., (1997). "Air bubble entrainment in open channels: flow structure and bubble size distributions". *Int. J. Multiph. Flow* 23 (1), 193–203. doi: 10.1016/S0301-9322(96)00063-8

Chanson, H. (2013). "Hydraulics of aerated flows: qui pro quo?". *J. Hydraul. Res.*, 51 (3), 223–243.

Chanson, H., Brattberg, T. (2000). "Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump". *Int. J. Multiph. Flow*, 26 (4), 583–607. doi: 10.1016/S0301-9322(99)00016-6

Chanson, H., Toombes, L., (2002). "Air–water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations". *Int. J. Multiph. Flow* 28 (11), 1737–1761. doi: 10.1016/S0301-9322(02)00089-7

Duarte, R., Schleiss, A. J., Pinheiro, A. (2015). "Influence of jet aeration on pressures around a block embedded in a plunge pool bottom". *Environmental Fluid Mechanics*, 15, 673–693.

Ehrenberger, R., (1926). "Wasserbewegung in steilen Rinnen (Schußrinnen) mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung". Hydrographisches Zentralbüro im Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft.

Ervine, D. A., Falvey, H. T. (1987). "Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 83(1), 295–314.

Ervine, D. A., McKeogh, E., Elsayy, E. M. (1980). "Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69(2), 425–445.

Hager, W.H., (1992). "Energy Dissipators and Hydraulic Jump". Springer, Water Science and Technology Library, Vol. 8.

Killen, J. M., (1968). "The surface characteristics of self-aerated flow in steep channels". Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, USA.

Meireles, I. C., Bombardelli, F. A., Matos, J. (2014). "Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: an analysis". *J. Hydraul. Res.* 52(3), 375–385. doi: 10.1080/00221686.2013.878401

Long, D., Rajaratnam, N., Steffler, P.M., Smy, P.R. (1991). "Structure of flow in hydraulic jumps". *Taylor & Francis J. Hydraulic Res.* 29(2), 207–218.

Pfister, M., Hager, W.H., (2011). "Self-entrainment of air on stepped spillways". *Int. J. Multiph. Flow* 37 (2), 99–107. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.007

Rouse, H., Siao, T. T., Nagaratnam, S. (1958). "Turbulence characteristics of the hydraulic jump". *Trans. ASCE* 124, 926–966.

Straub, L. G., Anderson, A.G., (1958). "Experiments on self-aerated flow in open channels". *J. Hydraul. Div.* 84 (7), 1–35.

Valero, D., Bung, D. B. (2016). "Development of the interfacial air layer in the non-aerated region of high-velocity spillway flows. Instabilities growth, entrapped air and influence on the self-aeration onset". *Int. J. Multiph. Flow* 84, 66–74. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.012

Valero, D., García-Bartual, R., (2016). "Calibration of an air entrainment model for CFD spillway applications". *Adv. Hydroinformatics* 571–582. P. Gourbesville et al. Springer Water. doi: 10.1007/978-981-287-615-7_38

Wood, I. R., (1991). "Air Entrainment in Free-surface Flows". Balkema.

Wood, I. R., Ackers, P., Loveless, J., (1983). "General method for critical point on spillways". *J. Hydraul. Eng.* 109 (2), 308–312.

Zhang, G., Chanson, H. (2017). "Application of local Optical Flow methods to high-velocity air-water flows: validation and application to skimming flows on stepped chutes". The University of Queensland, School of Civil Engineering, Report CH105/17.