

XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016

MODELACIÓN CFD DE ROTURA DE PRESAS
EN PRESENCIA DE OBSTÁCULOS

José A. Vásquez, Daniel M. Robb

Northwest Hydraulic Consultants, Canadá, jvasquez@nhcweb.com, drobb@nhcweb.com

RESUMEN:

La rotura de presas, ya sean artificiales o naturales, puede causar aguas abajo daños muy serios, en muchos casos acompañados con pérdida de vidas humanas. Por ejemplo, sólo en la Cordillera Blanca del Perú se ha estimado que 32000 personas han fallecido en el último siglo como consecuencia de rotura de presas de morrenas; mientras que 19 personas murieron en Brasil el año pasado por la rotura en cascada de dos presas de relave. La modelación de las ondas de inundación causada por rotura de presas en ambiente urbanos es importante por la concentración de personas e infraestructura en dichos ambientes; pero a la vez también es muy compleja debido a la presencia de estructuras como edificaciones y puentes que actúan como obstáculos al flujo afectando su propagación, velocidad y niveles de inundación. Por otro lado, las fuerzas hidrodinámicas causadas por las ondas pueden dañar estructuras, por lo que la estimación de dichas fuerzas puede ser necesario para evaluar su vulnerabilidad. En este artículo demostramos que los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) OpenFOAM y Flow-3D puede reproducir muy bien tanto el flujo de rotura de presas alrededor y por encima de obstáculos, así como las fuerzas hidrodinámicas ejercidas en ellos.

ABSTRACT:

Natural or artificial dam-breaks can cause both severe flood damage and human fatalities. For example, in Peru around 32000 people have died from moraine dam failures over the past century; while in Brazil 19 people died last year due to the failure of two tailings dams. Modeling dam-break floods in urban environments is particularly challenging because structures such as buildings and bridges act as obstacles to the flow, potentially altering the flood propagation, speed and depth. Additionally, dam-break flood waves can cause extremely high forces on those structures, which may be needed to take into account when assessing their vulnerability. In this paper, we demonstrate that the computational fluid dynamics (CFD) models OpenFOAM and Flow-3D can simulate quite well the hydrodynamics of dam-break flood waves around and over obstacles; as well as the forces exerted on them.

PALABRAS CLAVES: rotura de presas; CFD; fuerzas hidrodinámicas; Flow-3D; OpenFOAM

INTRODUCCIÓN

La rotura de una presa (*dam break*), ya sea ésta natural o artificial puede causar, además de daños catastróficos, un gran número de pérdidas de vidas humanas, como se ilustra con algunos ejemplos en la Tabla 1. Uno de los peores desastres históricos sucedió en 1975, cuando entre 85,000 a 171,000 personas murieron como consecuencia de la rotura de las presas Banqiao y Shimantan en China; a la vez que 11 millones de personas perdieron sus hogares (Zagonjulli 2007, Wikipedia 2016). La razón porque las roturas de presa son tan devastadoras está en la liberación súbita o muy rápida del volumen líquido almacenado aguas arriba de la presa, lo cual genera caudales extraordinariamente altos, mayores a los producidos por razones puramente hidrológicas. El record de caudal registrado en un valle corresponde justamente a una rotura de presa. Al fin de la era glacial, hace 12,000 a 15,000 años, la presa de hielo que formaba el Lago Missoula en Montana, EEUU, se rompió generando un caudal superior a 20×10^6 m³/s, mayor que el caudal combinado de todos los ríos del planeta juntos.

Tabla 1.- Ejemplos de roturas de presas (Lliboutry et al. 1977a,b; Costa y Schuster 1988; Lee y Duncan 1975; Schuster y Highland 2001, Vilimek et al. 2005).

Año	Nombre y Ubicación	Tipo de presa	Altura de presa [m]	Caudal [m ³ /s]	Daños/Comentarios
2015	Presas Fundão y Santarem, Brasil	Relaves	80 y 50	60,000	19 muertos, 200 casas destruidas
1978	Mayunmarca, Rio Mantaro, Perú	Deslizamiento	170	15,000	3 puentes, 20 km de carreteras
1975	Presa Teton, EEUU	Tierra	77	65,000	3 muertos, \$2000 millones en pérdidas
1975	Presa Banqiao, China	Tierra	26	78,000	85,000 a 171,000 muertos
1960	Presa Orós, Brasil	Tierra	35	60,000	30,000 personas afectadas
1959	Presa Malpasset, Francia	Arco	60	45,000	423 muertos en pueblo de Frejus
1951	Artesoncocha, Perú	Morrena**	113*	-	-
1950	Laguna Jancarurish, Perú	Morrena**	21*	8,000	200 a 500 muertos
1945	Condor-Sencca, Rio Mantaro, Perú	Deslizamiento	100	35,000	13 puentes destruidos
1941	Palcacocha, Perú	Morrena	47*	-	4000 muertos en Huaraz
1928	Presa San Francisquito, EEUU	Arco	56	-	431 muertos
1725	Quebrada Ancash, Perú	Morrena	-	-	2000 muertos en poblado Ancash
15,000 AC	Lago Missoula, EEUU	Glaciar	~1000	>20,000,000	Al fin de la edad de hielo

*Disminución de nivel de agua en el lago después de la rotura de la presa morrénica (Costa y Schuster 1988, Vilimek et al. 2005)

** Destruída por una onda tsunami causada por la caída de bloques de hielo (Lliboutry et al. 1977a)

La rotura de presas artificiales está bien documentada, con los casos más conocidos en el mundo como la presa de concreto San Francisquito en EEUU; la presa de arco Malpasset en Francia; y la presa de tierra Teton en EEUU, resumidos en la Tabla 1. Un caso reciente fue las dos presas de relaves (*tailing dams*) Fundão y Santarem en Brasil, las cuales fallaron el 5 de noviembre de 2015 y destruyeron casas y edificios en el poblado de Bento Rodrigues. Según muestra la Figura 1, la onda de inundación debe haber generado fuerzas hidrodinámicas lo suficientemente altas para causar la falla estructural de los edificios en Bento Rodrigues. Algo menos conocido es la falla de presas naturales, que en el caso del Perú ha sucedido en varias oportunidades. Para beneficio del lector interesado se presenta a continuación una breve descripción de varios casos históricos.

Rotura de Presas Naturales en el Perú

Las presas naturales se forman típicamente por morrenas de un glaciar que se ha retirado y deja un lago detrás de él (Figura 2); o por el bloqueo al flujo de un río causado por hielo o un deslizamiento de tierra (Figura 3). Debido a la recesión de glaciares en la Cordillera Blanca del Perú (Lliboutry et al. 1977a), se han generado muchas presas de morrenas, varias de las cuales han fallado en los últimos 100 años (Tabla 1) causando la muerte estimada de 32000 personas (Hubbard et al 2005).



Figura 1.- Imágenes de edificaciones en Bento Rodrigues, Brasil, antes y después de la rotura de las presas Fundão y Santarem el 5 de noviembre de 2015 (*Folha do São Paulo*).

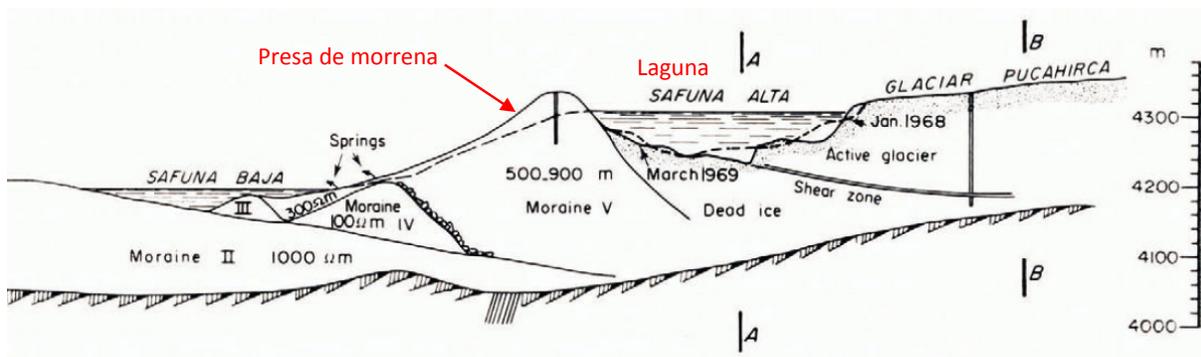


Figura 2.- Ejemplo de un presa natural de morrena, Laguna Safuna Alta, Perú (Lliboutry et al. 1977b).

En 1941, la rotura de la presa de morrena en la Laguna Palcacocha liberó $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua, lo cual causó la rotura de la presa de morrena de la Laguna Jircacocha situada 8 km aguas abajo, liberando $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua adicional. El flujo resultante avanzó 15 km hasta la ciudad de Huaraz, donde destruyó el 25% de la ciudad ($970,000 \text{ m}^2$) y causó la muerte de 4,000 personas (Vilimek et al. 2005). En 1950, la rotura de la presa de morrena que formaba la Laguna Jancarurish generó un flujo aluvional en la Quebrada Cedros y el Rio Santa con velocidades estimadas de 10 m/s, el cual arrastró por un distancia de 20 km el pilar de concreto de un puente con dimensiones de $5 \times 7 \times 25 \text{ m}^3$, causando además la muerte de entre 200 a 500 personas (Lliboutry et al. 1977a). Debido al calentamiento atmosférico actual que afecta la estabilidad del hielo en los glaciares y presas de morrena, se espera que el riesgo de fallo de dichas presas aumente en el futuro (Hubbard et al 2005, Vilimek et al. 2005).

Uno de los mayores deslizamientos de tierra registrado en tiempos históricos, estimado en un volumen de $1600 \times 10^6 \text{ m}^3$ sucedió el 25 de abril de 1974 en el Perú, en la localidad de Mayunmarca (Lee y Duncan 1975; Hutchinson y Kojan 1975). Este deslizamiento formó una presa de 170 m de altura en el río Mantaro (Figura 3), formando un lago de 30 km largo con un volumen de agua de $670 \times 10^6 \text{ m}^3$. La presa se rompió 44 días después y a 100 km de distancia en la central hidroeléctrica del Mantaro, la onda de inundación aún tenía 20 m de altura. La onda destruyó 20 km de carreteras y tres puentes, además de tierras de cultivo y viviendas en el valle. Esta no es la primera presa natural que se rompe en el río Mantaro, en 1945 un deslizamiento en Cerro Condor-Senca formó otra presa de 100 m de alto con un lago de $300 \times 10^6 \text{ m}^3$, que al romperse destruyó 13 puentes y tierras de cultivo (Hutchinson y Kojan 1975; Schuster y Highland 2001). Otro ejemplo en el Perú, esta vez en el río Santa, fue la rotura de una presa natural que se formó después del terremoto de 1970; la cual generó ondas que en la localidad de Huallanca alcanzaron 20 m de altura y una velocidad estimada de 10 m/s. La onda de avenida inundó los 165 km del río Santa hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, causando cuantiosos daños a su paso (Plafker et al. 1971).

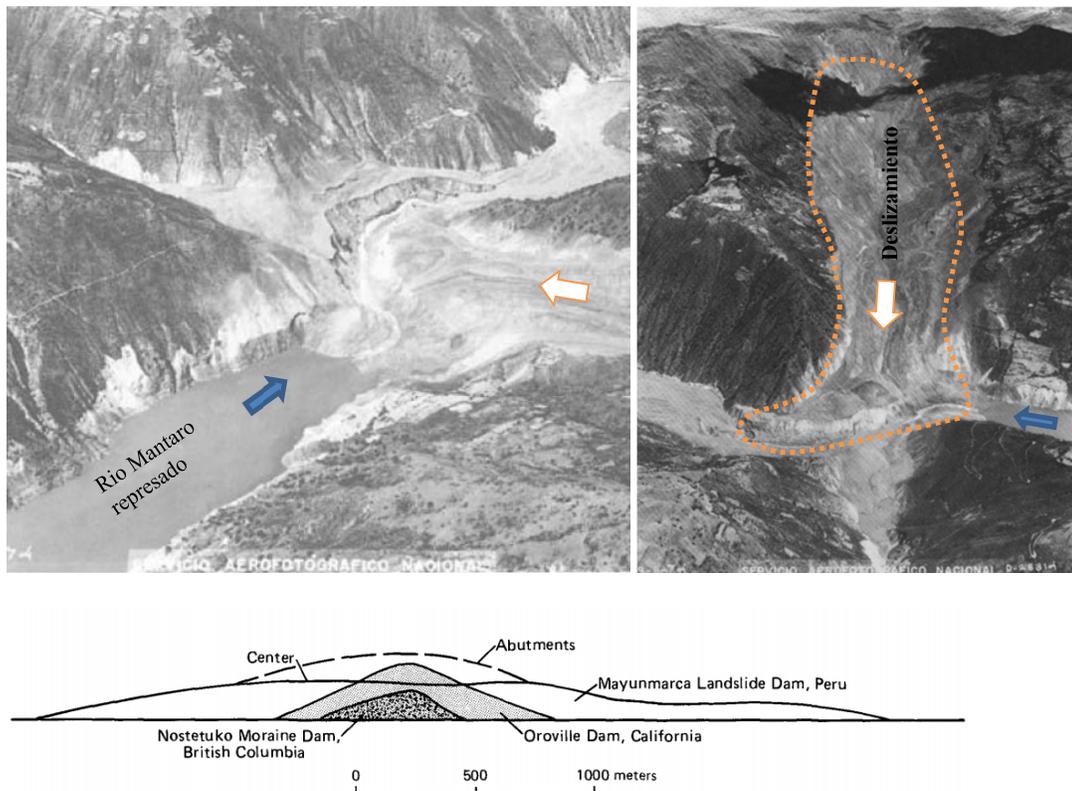


Figura 3.- Presa natural en el río Mantaro causada por el deslizamiento de Mayunmarca en 1978 (fotos del Servicio Aerofotográfico Nacional del Perú) y perfil de la presa Mayunmarca (Costa y Schuster 1988).

Modelación CFD de rotura de presas

La modelación de las ondas de inundación causada por rotura de presas en ambiente urbanos es importante, porque es en dichas zonas urbanas donde se concentran la población e infraestructura que podrían resultar afectados por la onda de inundación. Sin embargo, dicha modelación resulta complicada porque la presencia de estructuras como edificios y puentes que actúan como obstáculos al flujo alterando su velocidad, profundidad y dirección de propagación. Al mismo tiempo, las fuerzas hidrodinámicas causadas por las ondas pueden dañar estructuras (Figura 1), por lo que la estimación de dichas fuerzas puede ser necesario para evaluar su vulnerabilidad.

El propósito principal del presente artículo es verificar si modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) son capaces de calcular de manera confiable las fuerzas hidrodinámicas en objetos sólidos causadas por ondas de rotura de presa; para lo cual se hace uso de los datos experimentales de Aureli et al. (2015); así como los dos modelos CFD Flow-3D (www.flow3d.com) y OpenFOAM (www.openfoam.org). Pero antes de proceder a la modelación de fuerzas, se muestra la verificación numérica de la modelación de flujo de rotura de presas en presencia de obstáculos usando los experimentos de Soares-Frazão (2007), Soares-Frazão y Zech (2007) y Testa et al. (2007).

MODELACION DE FLUJO

Umbral Triangular (Soares-Frazão 2007)

En el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Louvain (UCL) en Bélgica, Soares-Frazão (2007) realizó experimentos del flujo sobre un umbral de fondo triangular, causado por una rotura súbita de presa (Figura 4). Como es típico en este tipo de experimentos, la rotura de la presa se simulaba mediante la apertura súbita de una compuerta. Los niveles de agua en el tiempo se midieron en 3 sondas de presión ubicadas alrededor del umbral triangular. Vásquez y Roncal (2009) aplicaron Flow-3D para simular este experimento con excelentes resultados. Posteriormente Robb y Vasquez (2015) realizaron verificaciones adicionales usando el modelo hidrodinámico bidimensional Telemac-2D y el modelo CFD OpenFOAM, obteniendo también buenos resultados, como se muestra en la Figura 4.

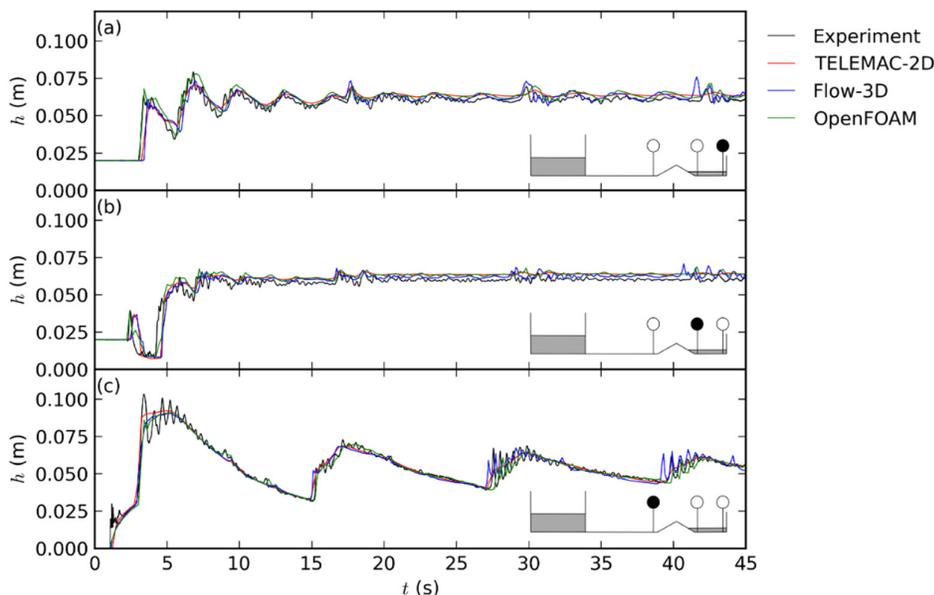


Figura 4.- Modelación de flujo sobre un umbral de fondo triangular (Soares-Frazão 2007) usando el modelo hidrodinámico Telemac-2D y modelos CFD OpenFOAM y Flow-3D (Robb y Vasquez 2015).

Obstáculo Aislado (Soares-Frazão y Zech 2007)

En el laboratorio de la UCL, Soares-Frazão y Zech (2007) realizaron experimentos del flujo causado por una rotura súbita de presa alrededor de un obstáculo aislado que tenía forma prismática y estaba alineado 64° con relación al eje del canal (Figura 5). El canal aguas abajo tenía un sección ligeramente trapezoidal y se encontraba seco al inicio del ensayo. Los niveles de agua en el tiempo se midieron en 5 sondas de presión ubicadas alrededor del obstáculo. El flujo resultante fue muy complejo, por la presencia de ondas cruzadas y saltos hidráulicos móviles.

Vásquez y Roncal (2009) aplicaron Flow-3D para simular este experimento con muy buenos resultados. Posteriormente Robb y Vasquez (2015) realizaron verificaciones adicionales usando Telemac-2D y OpenFOAM obteniendo también muy buenos resultados (Figura 5). Una de las conclusiones prácticas de dicho estudio fue que el modelo Telemac-2D predice los niveles de agua con precisión comparable a la de los modelos CFD más sofisticados. Estos resultados, sumados a los de Hervouet y Petitjean (1999), confirman que Telemac-2D es un modelo muy apropiado para aplicaciones prácticas de ingeniería hidráulica, si el objetivo es calcular niveles de agua, velocidades y caudales.

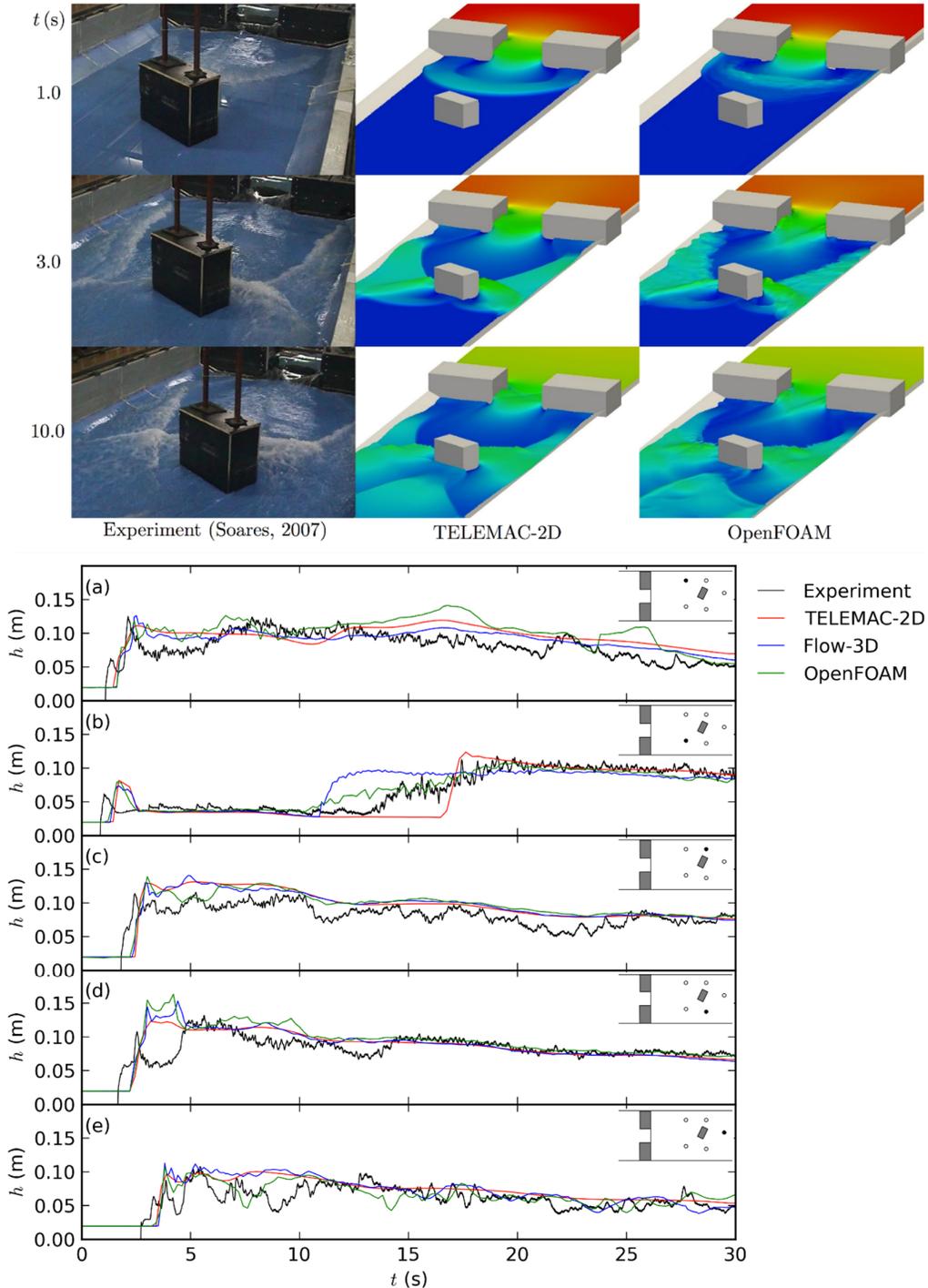


Figura 5.- Modelación de flujo alrededor de obstáculo aislado (Soares-Frazão y Zech 2007) usando el modelo hidrodinámico Telemac-2D y modelos CFD OpenFOAM y Flow-3D (Robb y Vasquez 2015).

Distrito Urbano (Testa et al. 2007)

En el *Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI)*, Testa et al. (2007) realizaron experimentos de flujo en un distrito urbano idealizado con varios bloques individuales representando edificios. El distrito urbano fue simulado bajo cuatro condiciones, correspondientes a dos topografías y dos alineamientos de los edificios diferentes. Roncal y Vásquez (2009) aplicaron con el éxito el modelo Flow-3D para simular estos experimentos, reproduciendo muy bien las observaciones de Testa et al. (2007). Esta fue una de las primera aplicaciones de un modelo CFD 3D con topografía y geometría complejas (Figura 6), ya que la mayoría de aplicaciones CFD hasta ese momento se habían limitado a canales de fondo plano, como los mostrados en las Figuras 4 y 5.

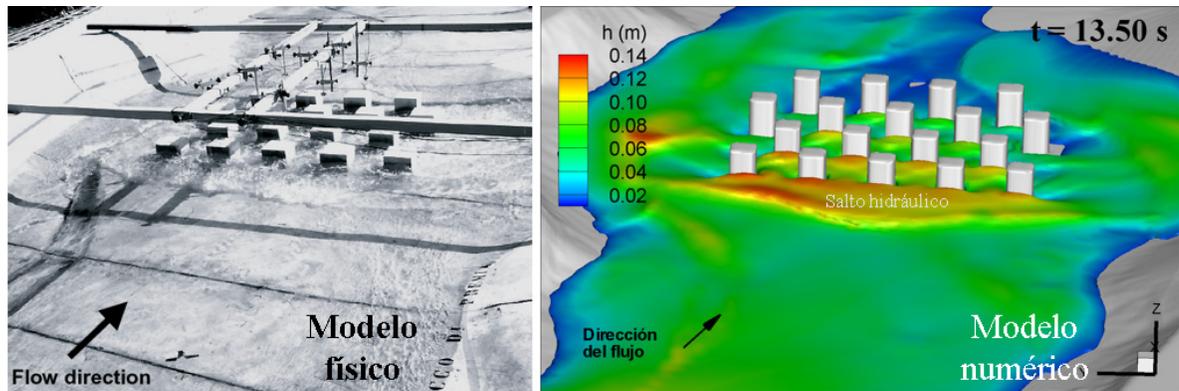


Figura 6.- Modelación CFD del flujo causado por una rotura de presa en un distrito urbano (Roncal y Vasquez 2009).

Todos estos resultados demuestran que los modelos CFD Flow-3D y OpenFOAM pueden modelar muy bien la hidráulica del flujo alrededor de obstáculos, como aquellos encontrados en ambiente urbanos. Como un paso adicional en esta línea de investigación, se verificó si dichos modelos también podían simular correctamente las fuerzas causadas por flujos de rotura de presas. A continuación, se presentan por primera vez los resultados inéditos de dicha investigación.

MODELACIÓN DE FUERZAS

El experimento de Aureli et al. (2015)

En el laboratorio de hidráulica de la universidad de Parma en Italia, Aureli et al. (2015) realizaron experimentos en un canal de 1.2 m de ancho y 2.6 m de largo en el cual se tenía un reservorio de 0.8 m de largo controlado por una compuerta central de 0.3 m de ancho (Figura 7). La rotura de la presa se simulaba mediante la abertura súbita de la compuerta. Un bloque prismático de 0.155 m de ancho, 0.3 m de espesor y 0.20 m de alto y ubicado a 0.51 m de distancia de la compuerta, contaba con una celda de carga para medir la fuerzas hidrodinámicas sobre el bloque en función del tiempo con una resolución temporal de 0.001 s. Los experimentos se realizaron con niveles de agua en el reservorio (h_u) entre 0.07 y 0.13 m, para los cuales se reportó la fuerza máxima medida en cada experimento. Sólo para el experimento con un nivel de agua de $h_u = 0.10$ m se reportó en detalle la variación de la fuerza en el tiempo o 'hidrograma' de fuerzas. Adicionalmente Aureli et al. (2015) también aplicaron un modelo 2D, el cual sobrestimó las fuerzas, probablemente por la aceleración vertical del flujo ignorada por dicho modelo; por ello en nuestro análisis sólo usamos modelos CFD.

Variación de fuerza en el tiempo ($h_u = 0.10$ m)

El experimento con un nivel de agua en el reservorio de $h_u = 0.10$ m se empleó para una verificación inicial de los modelos Flow-3D y OpenFOAM. La Figura 8 muestra una imagen de la superficie de agua calculada por Flow-3D y los resultados de la variación de la fuerza en el tiempo

medido durante los primeros 3 s después de abrir la compuerta, conjuntamente con los resultados de Flow-3D y OpenFOAM. El experimento muestra que la fuerza es muy variable en el tiempo produciéndose tres picos, siendo el primer pico de 7 N el mayor de todos. Los dos modelos CFD capturan muy bien el tiempo de llegada de la onda que ocurre a 0.36 s. Flow-3D captura muy bien la magnitud y tiempo de ocurrencia del pico máximo; pero tiende a sobrestimar los otros picos. OpenFOAM sigue la tendencia general de las fuerzas medidas, pero las subestima. Por ello, para los análisis subsecuentes sólo se empleó Flow-3D.

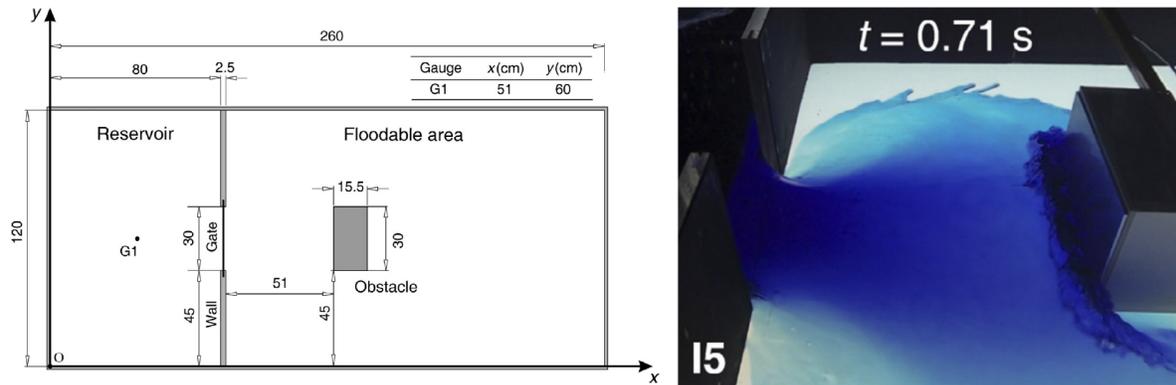


Figura 7.- Vista en planta del canal experimental y fotografía del flujo en el momento que se produce la máxima fuerza en el obstáculo (Aureli et al. 2015).

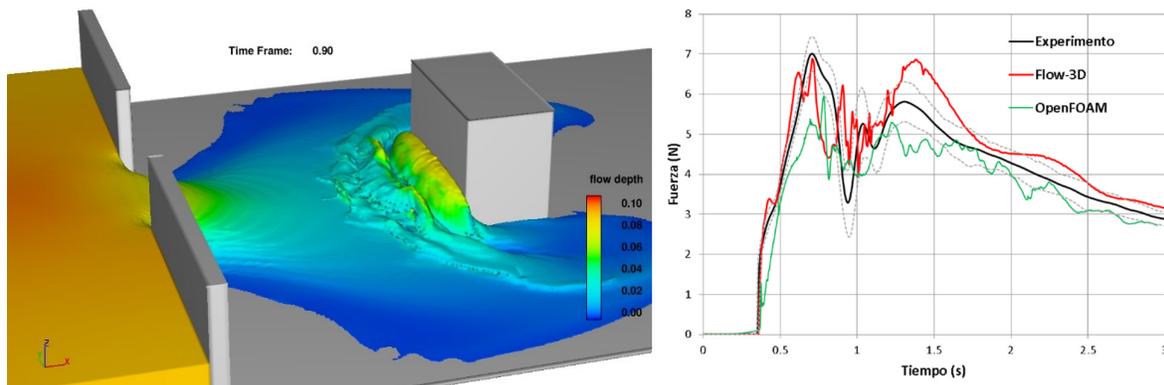


Figura 8.- Modelación CFD del experimento de Aureli et al. (2015) para determinar las fuerzas en un bloque causadas por un flujo de rotura de presa: superficie de agua calculada por Flow-3D (izquierda) y variación de la fuerza en el tiempo medida y calculada por modelos CFD (derecha).

Aureli et al. (2015) aplicaron un modelo 3D que sobrestimó el segundo pico de fuerzas, similar a los resultados de Flow-3D (Figura 8). Según Aureli et al. (2015) cuando la onda impacta el bloque por primera vez, el flujo remonta sobre la cara del bloque y colapsa sobre sí mismo formando un rollo en la base del bloque (Figuras 7 y 8). El colchón de aire dentro del dicho rollo causa la disminución de la fuerza ejercida en el segundo pico y como dicho efecto no es considerado por los modelos, esto explicaría porque el segundo pico de fuerzas fue sobrestimado por Flow-3D. Para investigar esta hipótesis, se hizo una simulación adicional en Flow-3D activando el modelo de inclusión de aire (Hirt 2012), el cual redujo la magnitud del segundo pico, como se observa en la Figura 9, aunque también causó una ligera reducción en el primer pico.

Flow-3D fue configurado con el modelo de turbulencia k-epsilon RNG y pérdidas por fricción despreciables. Como análisis preliminares mostraron que celdas de 0.01 m causaban fuerzas mayores a las observadas, se adoptó una malla con 5'241,600 celdas cúbicas de 0.005 m de resolución. Esta misma configuración del modelo, sin incluir los efectos del aire, se mantuvo en las simulaciones de las fuerzas máximas descritas a continuación.

Fuerzas máximas

Se realizaron cuatro simulaciones adicionales con Flow-3D, con niveles iniciales de agua en el reservorio variando entre $h_u = 0.07$ m y $h_u = 0.13$ m. La fuerza máxima calculada por Flow-3D en cada una de las 5 simulaciones se comparó con los valores correspondientes medidos en el modelo físico, tal y como se muestra en la Figura 9. Las líneas grises punteadas representan el rango de valores medidos en el modelo físico en varios experimentos. Los resultados de Flow-3D son bastante buenos y en la mayoría de casos caen dentro del rango de los valores experimentales.

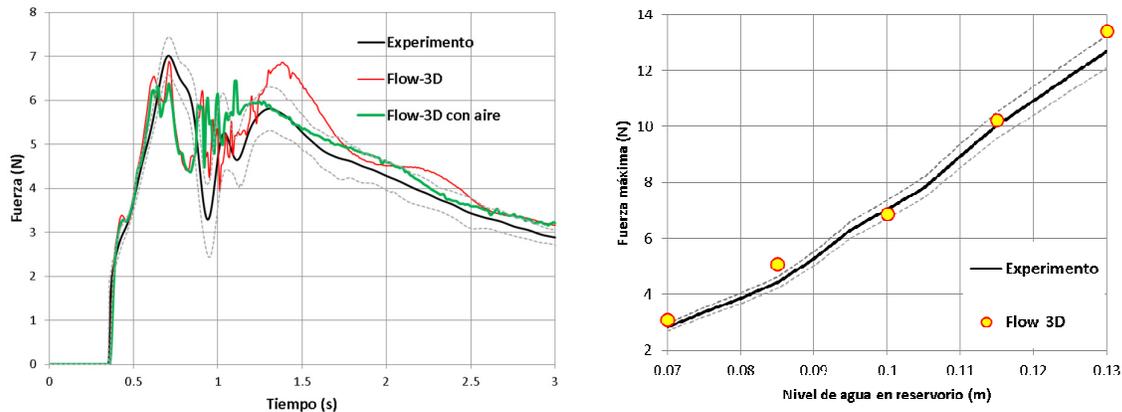


Figura 9.- Reducción del picos causado por la inclusión de aire in Flow-3D (izquierda); fuerzas máximas causadas medidas experimentalmente y calculada por Flow-3D sin inclusión de aire (derecha)

COMENTARIOS FINALES

Las terribles tragedias en Bento Rodrigues (Figura 1), Huaraz y Ancash (Tabla 1), sirven como ejemplo de las devastadoras consecuencias de destrucción y muerte que las ondas causadas por roturas de presas pueden causar en zonas urbanas, a la vez que resaltan la importancia de modelar de manera confiable la hidrodinámica de tales ondas en dichas condiciones.

La práctica usual en la consultoría actual es modelar la rotura de ondas usando modelos unidimensionales, los cuales son incapaces de modelar la presencia de obstáculos en zonas urbanas. En los pocos casos que se emplean modelos 2D, los obstáculos urbanos suelen representarse mediante un incremento de la rugosidad, pero dicha suposición es errónea ya que no es capaz de simular el intercambio de momento (fuerzas) entre el flujo y el obstáculo, que influye decisivamente en la propagación de la inundación. En caso se emplee un modelo 2D, los obstáculos deben representarse explícitamente en la malla del modelo, con lo cual ya se pueden obtener resultados muy realistas, como hemos demostrado usando el modelo Telemac-2D (Figura 5).

En caso de que el tamaño del obstáculo sea grande en relación a la profundidad del agua y la velocidad vertical sea importante, la suposición de aguas poco profundas y presión hidrostática de los modelos 2D podría dejar de ser válida, requiriéndose el uso de modelos 3D. En dichos casos, y especialmente cuando la geometría del obstáculo sea compleja, como en el caso del tablero de un puente, se recomienda emplear modelos CFD como OpenFOAM o Flow-3D. Cuando el cálculo confiable de fuerzas sea de particular importancia, se recomienda el uso de Flow-3D, pues como se hemos demostrado en esta investigación aplicada, Flow-3D produce resultados muy realistas de las fuerzas máximas esperadas, e inclusive puede tomar en cuenta los efectos de inclusión de aire en el flujo (Figura 9); aunque para efectos de diseño y con el fin de obtener resultados conservadores, se recomienda no incluir los efectos del aire en el cálculo de fuerzas máximas.

REFERENCIAS

- Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A., Mignosa, P., y Vacondio, R.** (2015). "Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure". *Advances in Water Resources*, 76, 29-42.
- Costa, J.E. y Schuster, R.L.** (1988). "The formation and failure of natural dams". *Geological Society of America Bulletin*. V. 100, p. 1054-1068, July 1988.
- Hervouet, J.-M., y Petitjean, A.** (1999). "Malpasset dam-break revisited with two-dimensional computations". *Journal of Hydraulic Research*, 37(6): 777-788.
- Hirt, C.W.** (2012). *Modeling Turbulent Entrainment of Air at a Free Surface*. Flow Science Report 01-12.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J.M., Quincey, D., Richardson, S.D., Zapata Luyo, M., et al.** (2005) "Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru". *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005;30(10):1251-64
- Hutchinson, J.N. y Kojan, E.** (1974). *The Mayunmarca Landslide of 25 April 1974*. UNESCO, Serial No. 3124/RMO.Ed/SCE. Paris, February 1975.
- Lee, K. L. y Duncan, J.M.** (1975). *Landslide of April 25, 1974 on the Mantaro River, Peru*. Report of Inspection. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A., and Schneider, B.** (1977a). "Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention". *Journal of Glaciology*, v. 18, p. 239-254.
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A., and Schneider, B.** (1977b). "Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. III. Study of Moraines and Mass Balances at Safuna". *Journal of Glaciology*, v. 18, p. 275-290.
- Plafker, G., Ericksen, G.E. y Fernandez, J.** (1971). "Geological Aspects of the May 31, 1970 Peru Earthquake". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(3): 543-578.
- Robb, D.M. y Vásquez, J.A.** (2015). "Numerical Simulation of Dam-Break Flows Using Depth-Averaged Hydrodynamic and Three-Dimensional CFD Models". *22nd Canadian Hydrotechnical Conference*. Montreal, Canadá.
- Roncal, J.J. y Vásquez, J.A.** (2009). "Modelación Tridimensional de Rotura de Presas". *Congreso de Estudiantes de Ingeniería Civil*. Lima, Perú.
- Soares-Frazão, S.** (2007). "Experiments of dam-break over a triangular bottom sill". *Journal of Hydraulic Research*, 45(Extra Issue): 19-26.
- Soares-Frazão, S., y Zech, Y.** (2007). "Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle". *Journal of Hydraulic Research*, 45(Extra Issue): 27-36.
- Schuster, R.L. y Highland, L.M.** (2001). *Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the Western Hemisphere*. US Geological Survey Open-File Report 01-276. Agosto 2001.
- Testa, G, Zuccalà, D, Al Crudo, F, y Mulet, J,** (2007). "Flash flood flow experiment in a simplified urban district", *Journal of Hydraulic Research* Vol. 45 (Extra Issue): 37-44
- Vásquez, J.A. y Roncal, J.J.** (2009). "Testing River-2D and Flow-3D for sudden dam-break flow simulations". *Conferencia anual de la Asociación Canadiense de Presas*. Whistler, BC, Canadá.
- Wikipedia** (2016). "Rotura de presa". Última actualización 29 de febrero de 2016; accedida el 2 de abril de 2016: https://es.wikipedia.org/wiki/Rotura_de_presa
- Yeh, H., Barbosa, A.R., Ko, H., y Cawley, J.G.** (2014). "Tsunami Loadings on Structures Review and Analysis". *Coastal Engineering Proceedings* Vol. 34, June 2014
- Vilímek, V., Zapata, M. L., Klimeš, J., Patzelt, Z., & Santillán, N.** (2005). "Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha lake area, Peru". *Landslides*, 2(2), 107-115.
- Zagonjoli, Migena** (2007). *Dam-break Modelling, Risk, Assessment and Uncertainty Analysis for Flood Mitigation*. Taylor & Francis.