

Artículo científico

# Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra)



D. López\*, R. Díaz, J.J. Rebollo, T. Ramos, F.R. Andrés y M.I. Berga

Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, P.º Bajo Virgen del Puerto 3, Madrid, España

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

### Historia del artículo:

Recibido el 21 de septiembre de 2015

Aceptado el 1 de marzo de 2016

On-line el 22 de abril de 2016

### Palabras clave:

Aliviadero en pozo

Metodo SPH (*smoothed particle**hydrodynamics*)

SPHERIMENTAL

Condición de fricción

## R E S U M E N

Son muchos los trabajos de calibración realizados que avalan la validez del método de hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para el análisis de flujos turbulentos en lámina libre. Sin embargo, sus altos requerimientos computacionales no permitían su empleo en trabajos reales. El desarrollo de las técnicas de supercomputación en unidades de procesamiento gráfico (GPU) ha modificado esta situación y está permitiendo su utilización como herramienta de diseño.

CEDEX ha desarrollado el modelo SPHERIMENTAL basado en esta tecnología con el fin de apoyar los experimentos realizados con modelación física. Esto ha permitido calibrar el modelo y emplearlo en el estudio de fenómenos complejos.

Se presentan los trabajos realizados para la comprobación hidrodinámica de flujos en lámina libre del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra), describiendo tanto los trabajos de calibración previos como los resultados obtenidos.

© 2016 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## Application of the SPH method in hydraulic structures studies. Hydrodynamic analysis of the Nagore dam morning glory spillway (Navarra, Spain)

### A B S T R A C T

Many calibration works have been performed to support the validity of the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for studying turbulent-free surface flows. However, its high computational requirements made it difficult to use in real cases. The development of techniques for supercomputing graphics processing units (GPU) has changed this situation, and is allowing its use as a design tool.

CEDEX has developed a model based on this technology, SPHERIMENTAL, in order to support studies on physical modelling. This has enabled the model to be calibrated in order to study complex phenomena.

This paper shows the works done to check the hydrodynamics free surface flows in the Nagore dam morning glory spillway, describing both the previous calibration works and the results obtained.

© 2016 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### Keywords:

Morning glory spillway

SPH method

SPHERIMENTAL

Friction boundary condition

## 1. Introducción

### 1.1. El aliviadero de la presa de Nagore

La presa de Itoiz terminó su puesta en carga en octubre de 2008 y desde entonces se encuentra en servicio generando un embalse de 417 hectómetros cúbicos de capacidad a su máximo nivel normal. La declaración de impacto ambiental de la presa de Itoiz estableció la necesidad de la construcción de sendos diques de cola en los ríos

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: david.lopez@cedex.es (D. López).

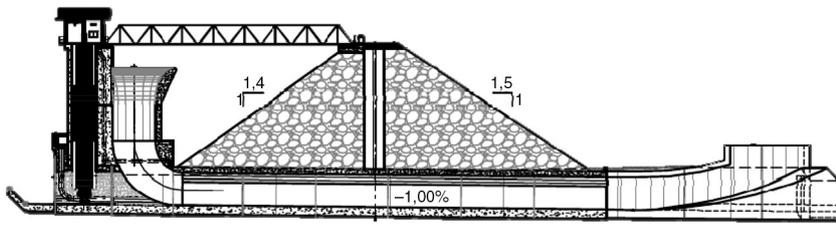


Figura 1. Esquema del aliviadero.

Urrobi e Irati a la altura de los núcleos urbanos de Nagore y Oroz Betelu.

La tipología de la presa de Nagore es de materiales sueltos con núcleo asfáltico. La longitud de coronación es de 622 m. La altura máxima sobre cimientos es de 32,20 m.

El aliviadero diseñado consiste en un pozo con vertedero circular. El perfil del labio de vertido está constituido por una curva tipo Creager. El máximo caudal desagüe por el aliviadero es de 378 m<sup>3</sup>/s. La galería de desagüe es usada en primera fase como desvío del río.

La solución que se propone construir como dique de cola consiste en una presa de materiales sueltos, coronada a la cota 592,50 msnm.

El aliviadero en pozo se levanta junto al pie de aguas arriba de la presa. Forma parte de una estructura conjunta que alberga tanto los desagües de fondo como el aliviadero de superficie. Para compatibilizar ambos fines dispone de una torre adosada al pozo que permite el accionamiento de las válvulas de regulación del desagüe (fig. 1).

El vertedero, con umbral a la cota 588, es circular, de 6,98 m de radio a la cota del umbral. Sin embargo, la torre adosada por el lado de aguas arriba limita su desarrollo en un ángulo de 37,91°, dejando una longitud neta de vertido a 38,23 m. El perfil del vertedero se ha diseñado para una lámina Ho = 3,50 m, que conduce el flujo hacia un pozo de vertical de 3,80 m de radio, alcanzando la tangencia a la cota 581,83 msnm. La sección circular del túnel se mantiene hasta la cota 575,31 msnm. A partir de esta cota arranca el codo que conecta el canal de descarga. En la sección de salida del codo su geometría es elíptica, de 9,00 m de eje mayor y 5,75 m de eje menor, con tangencia en la solera del canal a la cota 563,83 msnm. A continuación se dispone un carrete de transición a sección prismática, rectangular, de 9,00 m de ancho y 5,75 m de alto, con achaflanado en los vértices superiores. Esta sección se mantiene durante un tramo de 68,15 m. La cota de la solera en la sección de entrada es 563,77 msnm, y la pendiente del tramo es del 1%.

La entidad y complejidad del aliviadero justifican un exhaustivo análisis hidrodinámico del aliviadero. En primer lugar, se ha realizado un estudio numérico con el método de la hidrodinámica suavizada de partículas (SPH) para analizar el funcionamiento global en lámina libre y validar su viabilidad hidráulica, lo que también ha permitido mejorar algunas partes de su diseño y detectar los principales aspectos que se deben analizar en un posterior modelo físico (fig. 2).

En la fase de estudios previos se decidió modificar la estructura de dissipación de energía. Inicialmente se había planteado un cuenco de amortiguamiento. Sin embargo, se desconoce el comportamiento de este dispositivo con funcionamiento anegado por los niveles de lámina del embalse de Itoiz. Por este motivo se sustituyó el cuenco por un trampolín de planta curva, con el umbral de salida a la cota 569,50 msnm, lo que además permite mantener llena la galería que discurre bajo la presa para evitar los transitorios de puesta en carga durante el desagüe de una avenida. Además, se han tanteado diferentes geometrías en la transición de salida realizando diferentes propuestas (fig. 3), adoptándose finalmente la mostrada en la figura 3b, que reduce las pérdidas de carga en

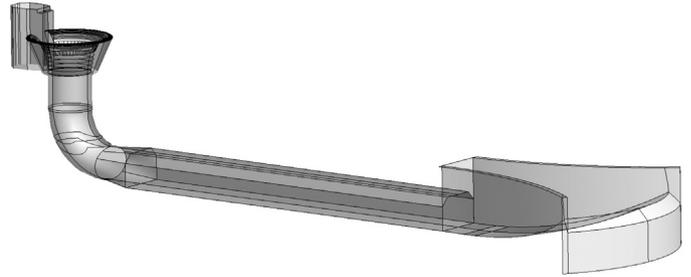


Figura 2. Vista global de la estructura del aliviadero en pozo. Se aprecia el vertedero circular, el pozo, el codo, la galería rectangular y el dispositivo de dissipación constituido por un trampolín semisumergido.

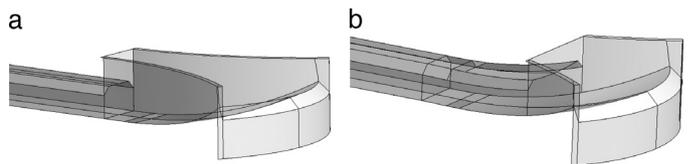


Figura 3. Estructura de dissipación de energía en desembocadura. La figura b introduce un carrete de transición para aumentar la sección de salida al embalse de Itoiz.

la desembocadura para funcionamientos anegados por el nivel del embalse de Itoiz.

## 2. Método

### 2.1. El método de hidrodinámica suavizada de partículas en fluidos cuasicompresibles

La SPH es un método numérico lagrangiano que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para el estudio de flujos hidrodinámicos en lámina libre. Este método discretiza el dominio fluido en partículas y permite obtener el valor de una variable de campo en una partícula «a» por interpolación, mediante una función de suavizado denominada Kernel, que cumple una serie de requisitos matemáticos [1] y que pondera el valor de la variable de estudio con el de las partículas de fluido del entorno «b», entendiendo como tales aquellas que quedan dentro del radio de suavizado de la función de interpolación con centro en la partícula «a».

Las ecuaciones (1) y (2) muestran la expresión de tales ecuaciones de forma discreta para fluidos cuasicompresibles (W-SPH):

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (1)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla W_{ab} \quad (2)$$

En estas expresiones, se denomina con el subíndice *a* a la partícula objetivo, sobre la que se calcula el valor de una propiedad de campo, y con el subíndice *b* a las partículas que quedan dentro del

entorno de interpolación de la partícula «a».  $v$  denota velocidad,  $p$ , presión y  $\rho$ , densidad.  $W_{ab}$  es el valor de la función de interpolación, y  $\nabla_a W_{ab}$  el de su derivada. El término  $\Pi_{ab}$  de la ecuación de la aceleración (2) representa la disipación viscosa. Se suele representar de la forma siguiente (Monaghan, 1994):

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab} + \beta \mu_{ab}^2}{\bar{\rho}_{ab}} & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

El parámetro  $\mu_{ab}$  tiene el valor:

$$\mu_{ab} = \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2} \quad (4)$$

El valor de  $\eta$  no se define en la referencia citada. Su objeto es evitar singularidades cuando  $r_{ab} \approx 0$ . Se suele adoptar un valor de  $\eta^2 \approx 0.01 h^2$  [2].

El término  $\Pi_{ab}$  se anula cuando las partículas del par a,b se alejan, y ejerce una aceleración opuesta al gradiente de presiones entre partículas que se aproximan, es decir, disipa energía cinética.

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son adimensionales y en astrofísica suelen adoptar valores de  $\alpha=1$  y  $\beta=2$ . En flujos de superficie libre, habitualmente se toma un valor en el cálculo de  $\alpha=0,01$  y  $\beta=0$ . El término cuadrático en la expresión (3) se ha empleado en astrofísica para tratar choques entre flujos de gases.

En López et al. [3] se propone un método para mejorar la representatividad de la disipación viscosa en flujos altamente turbulentos, como el resalto hidráulico. En este modelo se propone hacer variable el coeficiente  $\alpha$  de la ecuación (3) en función de la vorticidad de las partículas, estableciendo un coeficiente  $\alpha_{vor}$ .

La ecuación de estado empleada es la propuesta por Monaghan [4].

$$p_a = \frac{\rho_0 c_s^2}{\gamma} \left( \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (1)(5)$$

donde  $c_s$  es la velocidad del sonido en el medio y  $\rho_0$  una densidad de referencia; se toma habitualmente  $\gamma=7$ , lo que da lugar a una dependencia muy rígida de la presión con la densidad.

La ventaja de emplear un método cuasicompresible es que permite plantear un esquema numérico explícito, mucho más eficiente desde un punto de vista computacional, sin que esto afecte a la calidad de los resultados [5].

Para reproducir los contornos se han empleado partículas fijas con fuerzas repulsivas de Lennard-Jones.

$$f_a(r_{ab}) = d_o \left( \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right)^{p_1} - \left( \frac{r_0}{r_{ab}} \right)^{p_2} \right) \frac{r_{ab}}{r_{ab}^2} - C_{rough} \frac{V_{par}^2}{r_o} \quad (6)$$

donde  $f$  es la fuerza repulsiva que ejercen las partículas de contorno sobre las partículas de fluido que se aproximan,  $d_o$  es una cte. elástica,  $r_{ab}$  es la distancia relativa entre partículas de fluido y contorno, y  $p_1$ ,  $p_2$  son los exponentes, que habitualmente pueden tomar valores de 4 y 2, aunque existen en la bibliografía técnica otras combinaciones de valores. En esta formulación se ha incluido un término adicional, que permite introducir los efectos de la fricción en el contorno. Este término introduce una aceleración a las partículas de fluido que interacciona sobre el contorno, en sentido contrario al vector velocidad de la partícula fluida. Esta fuerza es proporcional al cuadrado de su velocidad e inversamente proporcional al tamaño de la partícula. El coeficiente  $C_{rough}$  es el que permite calibrar la rugosidad. Otros tipos de condiciones de contorno se indican en Gómez-Gesteira et al. [6].

## 2.2. El modelo SPHERIMENTAL

SPHERIMENTAL es un software propio del CEDEX [7]. Se trata de un código FORTRAN-CUDA; es la evolución del modelo MDST [8], adaptado para computación paralela en tarjetas gráficas. La arquitectura de las tarjetas gráficas permite realizar operaciones con múltiples hilos de ejecución, lo que resulta de gran utilidad en el campo de la supercomputación. El método SPH tiene un gran coste computacional, por lo que esta vía permite abordar problemas de gran tamaño ( $0 \cdot 10^6$  partículas) con tiempos de cálculo menores que los que se pueden alcanzar en un cluster de CPU. Además, los costes de inversión y consumo de energía son mucho menores. Se han realizado ensayos de rendimiento con un caso de prueba dam break (rotura de presa) con un modelo de 2 millones de partículas, en el que se consiguieron reducir los tiempos de cálculo en 35 veces [7].

El método de búsqueda de pares de interacción emplea una malla cartesiana tridimensional auxiliar que cubre todo el dominio. El método asigna un código «hash» (etiqueta) a todas las partículas de una misma celda. Este código hash se calcula en función de las coordenadas espaciales de cada partícula [9]. La comprobación de la distancia de interacción se realiza únicamente entre las partículas ubicadas en celdas colindantes. Para optimizar el rendimiento y conseguir coalescencia en el acceso a memoria se reordenan todas las partículas de acuerdo con un criterio espacial, por la celda en la que se ubican y su orden dentro de esta. SPHERIMENTAL incorpora un sistema basado en operaciones con atomics (operación en paralelo que evita conflictos de sobrescritura con diferentes hilos de ejecución), que resulta 4 veces más eficiente que un método basado en ordenación con el algoritmo «radix-sort» [10]. Se ha obtenido una comparación de rendimiento con 2 arquitecturas de diferentes tarjetas gráficas Nvidia. Con arquitectura Kepler (GTX640M) se consigue una aceleración de 3,4 veces, y con la arquitectura Maxwell (GTX860M), de 5,0 veces [11].

Para optimizar el uso de memoria no se emplean estructuras para almacenar los pares de interacción. El cálculo de las derivadas se realiza de forma simultánea al de la búsqueda de pares de interacción, lo que permite no almacenar esta información. Esto posibilita computar  $3,8 \cdot 10^6$  partículas por cada Gb de memoria RAM de la tarjeta gráfica.

Las fuerzas de contorno introducen ciertas inestabilidades en el campo de densidades, por lo que se ha implementado un filtro estadístico de densidad que acota las densidades extremas en cada paso de tiempo a 2 veces la desviación típica respecto a la media de todas las partículas del sistema.

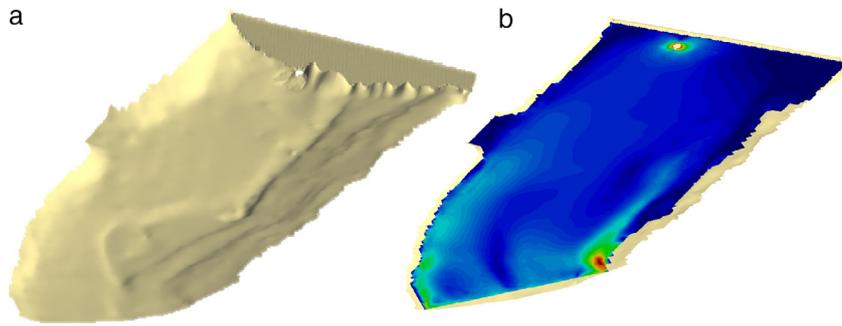
El método de integración empleado es Runge-Kutta de tercer orden tipo total variation diminishing [12]. Se emplea un paso de tiempo variable que se limita mediante un doble criterio, uno basado en la velocidad del sonido (7) y el otro en la aceleración (8), siendo el paso de tiempo el que resulta de la expresión (9).

$$dt_{cv} = \frac{h}{c_s + 0.6\alpha c_s} \quad (7)$$

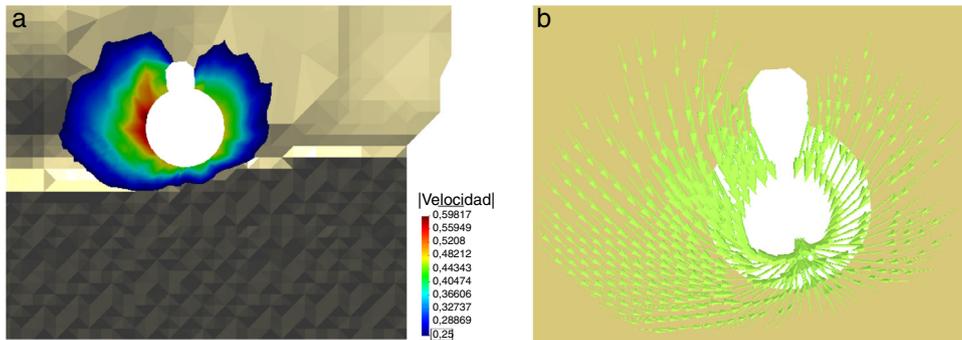
$$dt_f = \min \sqrt{\frac{h}{|dv_i|}} \quad (8)$$

$$dt = \min (1.5dt_{cv}, 0.3dt_f) \quad (9)$$

El CEDEX ha realizado con este software diversos trabajos de calibración y asistencia técnica [13,14].



**Figura 4.** Izquierda: vista del mapa digital de elevaciones del embalse de Nagore de la zona situada aguas arriba de la presa. Derecha: campo de velocidades en el embalse cuando por el aliviadero se desagua la avenida de 500 años de período de retorno ( $Q=335 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para el análisis de flujo de aproximación.



**Figura 5.** Detalle del campo de velocidades en la zona de aproximación al vertedero. Vista en planta. En la figura de la izquierda el límite corresponde a velocidades superiores a  $0,25 \text{ m/s}$  integrado en profundidad. Y la derecha muestra los vectores de velocidad del flujo de aproximación.

### 3. Resultados

Se presentan a continuación los trabajos de simulación numérica encaminados a comprobar el funcionamiento hidrodinámico del aliviadero de Nagore y proponer mejoras en su diseño.

#### 3.1. Diseño del experimento

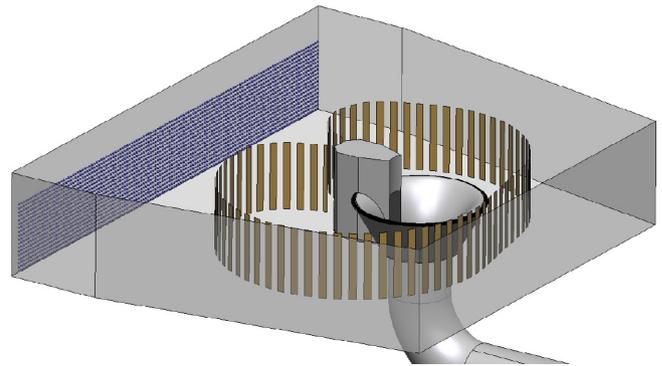
Se ha realizado una simulación hidrodinámica bidimensional del flujo en el embalse para analizar las características del flujo de llamada del vertedero del aliviadero de superficie. Esto permite conocer el reparto del flujo en el entorno del aliviadero para su implementación en el modelo tridimensional.

El estudio bidimensional se ha realizado con el modelo Iber. Se trata de un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen variable para el estudio hidromorfológico de cauces, desarrollado conjuntamente por el CEDEX, el Grupo Flumen (UPC), GEAMA (UC) y CIMNE (fig. 4).

Como resultado de este estudio se ha obtenido la dirección del campo de velocidades en el entorno del vertedero (fig. 5). Esto ha permitido diseñar una pantalla de reparto y tranquilización del flujo, que posibilita reproducir las condiciones del flujo de aproximación con un depósito de reducidas dimensiones (fig. 6). El alto coste computacional del modelo SPH 3D obliga a reducir la zona de aproximación del embalse.

Una vez definida la geometría del modelo se ha generado una malla no estructurada de  $0,20 \text{ m}$  en cuyos nodos se materializan las partículas de contorno. Estas partículas fijas confinan el fluido dentro del contorno mediante las fuerzas de Lennard-Jones (6) indicadas anteriormente. Han sido necesarias 370.000 partículas de contorno para modelizar el contorno.

El fluido se introduce a través de una condición de contorno de entrada consistente en un conjunto de partículas de fluido que se van incorporando al modelo con una velocidad inicial impuesta



**Figura 6.** Límites del depósito de alimentación del modelo tridimensional y pantalla de tranquilización y uniformización del flujo de aproximación.

(fig. 6). El caudal que se quiera establecer en la simulación marcará el intervalo de tiempo transcurrido entre la incorporación de 2 bloques consecutivos de partículas de fluido.

El fluido se ha discretizado en partículas de  $50 \text{ cm}$ . Este tamaño se ha adoptado como solución de compromiso entre la precisión del estudio y el alto coste computacional debido al gran número de simulaciones que ha sido necesario realizar y la duración de las mismas. Para estabilizar un caudal ha sido necesario realizar simulaciones de unos  $500 \text{ s}$ .

El número de partículas de cada simulación depende del caudal estabilizado, resultando necesarias 250.000 partículas de fluido para  $244 \text{ m}^3/\text{s}$  y unas 350.000 para  $466 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 3.2. Calibración de la fricción

En un modelo bidimensional integrado en profundidad las pérdidas de carga por fricción engloban la totalidad de pérdidas de energía, incluidos los efectos de la turbulencia sin entrar a

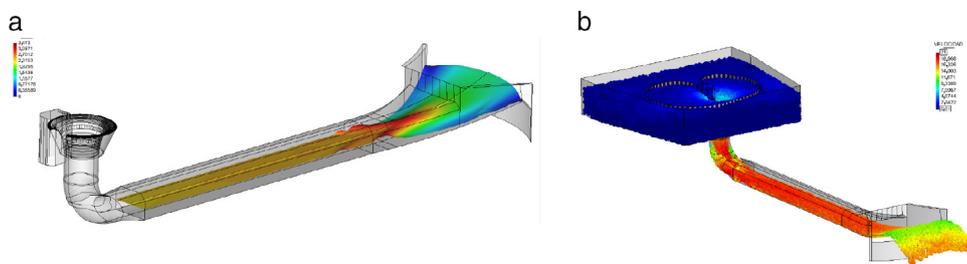


Figura 7. Caudal 378 m³/s. Nivel de embalse 590,87 msnm. Vo = 17,9 m/s. (a) Modelo Iber. (b) SPHERIMENTAL.

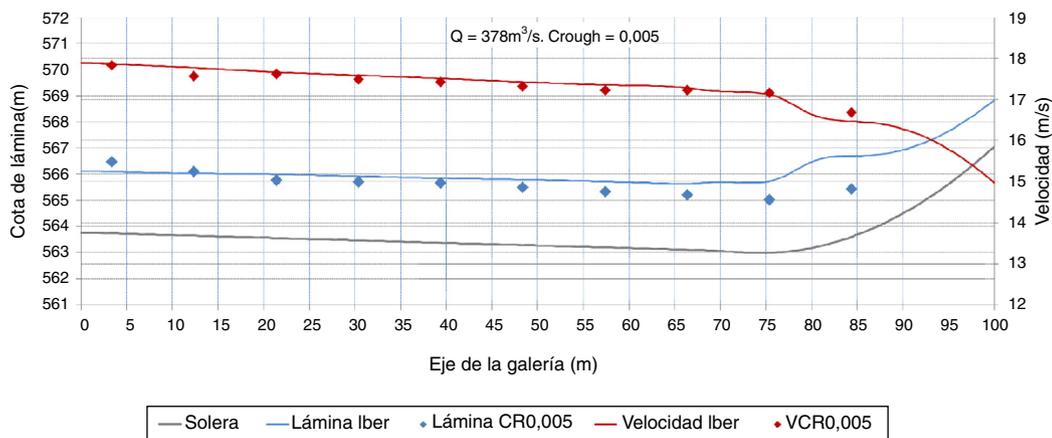


Figura 8. Caudal 378 m³/s. Nivel de embalse 590,87 msnm. Comparación de velocidad y lámina en el eje del canal de descarga entre ambos modelos. Iber (n = 0,016, vo = 17,9 m/s) y SPH (C<sub>rough</sub> = 0,005).

considerar los efectos de la aireación. Esto no supone un inconveniente, pues los valores de rugosidad de n Manning se han calibrado de este modo. En un modelo tridimensional hay que diferenciar, empleando disipación turbulenta en todo el dominio y disipación por fricción solo en las partículas que interactúan con el contorno. Esto marca una línea de investigación futura, que permita formular de forma general ambos mecanismos de disipación de energía de forma que se pueda emplear el modelo con validez general. A falta de este estudio, se hace imprescindible un trabajo de calibración ad-hoc en cada trabajo.

En este caso hemos empleado un modelo de turbulencia simplificado basado en la viscosidad artificial (Monaghan, 1994) con los coeficientes de viscosidad habituales en flujo de lámina libre indicados anteriormente.

Para reproducir la fricción en los contornos, el modelo SPHERIMENTAL introduce una tensión tangencial en estos, que actúa en sentido contrario al movimiento de las partículas de fluido próximas al contorno. Para regular la magnitud de esta tensión se emplea un coeficiente C<sub>rough</sub> (6).

La elección del valor de este coeficiente depende, por un lado, del grado de rugosidad que se desee introducir, y por otro, del grado de discretización de las partículas de fluido y del caudal unitario. Para poder definir el C<sub>rough</sub> más adecuado es necesario realizar ensayos de calibración. Puesto que no se dispone de datos de modelo físico o prototipo, se ha optado por calibrar la fricción comparando con otro modelo numérico, en circunstancias que sean representativas para ambos modelos. En este caso se ha empleado el modelo Iber, que permite reproducir correctamente las pérdidas por fricción en un canal rectangular. En consecuencia, se ha supuesto una hipótesis de funcionamiento en la que el flujo sea en lámina libre y permita, por tanto, realizar esta calibración.

Se ha estudiado el canal de descarga del aliviadero con el modelo Iber. Se han realizado diversas simulaciones con diferentes

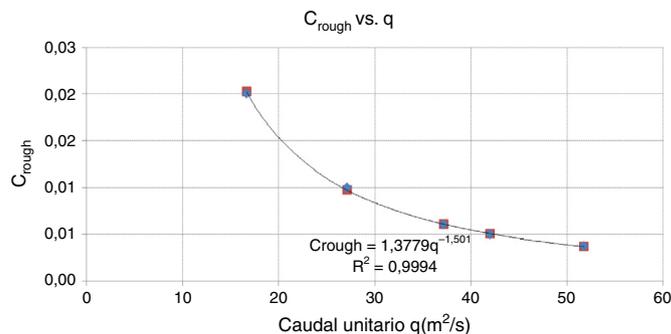


Figura 9. Caudal 378 m³/s. Nivel de embalse 590,87 msnm. Comparación de velocidad y lámina en el eje del canal de descarga entre ambos modelos. Iber (n = 0,016, vo = 17,9 m/s) y SPH (C<sub>rough</sub> = 0,005).

caudales. Como condición de contorno de entrada se ha empleado la velocidad media, medida en el modelo SPH en dicha sección. Se ha empleado un coeficiente de Manning n = 0,016.

La figura 7 muestra la superficie libre obtenida con el modelo Iber (a) y con SPHERIMENTAL (b) empleando el coeficiente C<sub>rough</sub> que mejor ajusta el perfil de velocidades en la rápida como se muestra en la figura 8.

Las líneas en la figura 8 corresponden a los resultados de Iber y los marcadores atañen a los resultados SPH. El color azul corresponde al nivel de lámina y el rojo a la velocidad. La correspondencia obtenida en velocidades es muy buena; sin embargo, se aprecian mayores discrepancias en la posición de la superficie libre en el último tramo del canal de descarga, pues Iber introduce unas ondas que se cruzan en la entrada del trampolín que son poco realistas (fig. 7).

La figura 9 presenta gráficamente la relación obtenida entre el coeficiente de rugosidad y el caudal unitario en el canal de descarga.

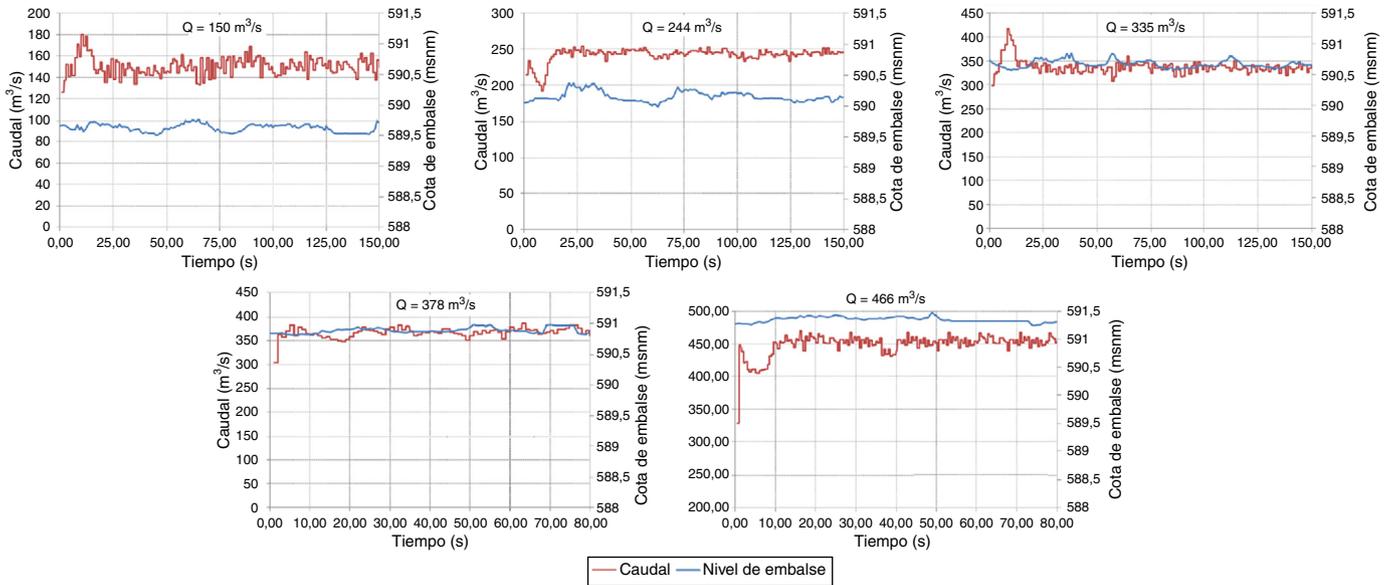


Figura 10. Gráficas de estabilización de nivel y caudal en los diferentes ensayos.

Esta relación es válida para reproducir la fricción equivalente a una  $n = 0,016$  (de Manning) y con partículas de 0,5 m.

### 3.3. Análisis hidrodinámico

Una vez calibrado el modelo se ha estudiado su funcionamiento para los diferentes caudales de estudio. Se han estabilizado 5 caudales de ensayo. La figura 8 muestra los registros de estabilización de los ensayos (fig. 10).

La figura 11a presenta en línea discontinua la curva de capacidad teórica del vertedero obtenida de acuerdo con las recomendaciones del Bureau of Reclamation como si de un aliviadero de planta recta se tratase. De hecho, para caudales bajos con poca lámina vertiente, los valores del coeficiente de desagüe son semejantes. Sin embargo, en un vertedero circular, a medida que aumenta la relación de lámina vertiente frente al radio del vertedero ( $H_e/R_s$ ), los efectos de la convergencia de las líneas de corriente y la sumergencia hacen que el coeficiente de desagüe sea menor que en un

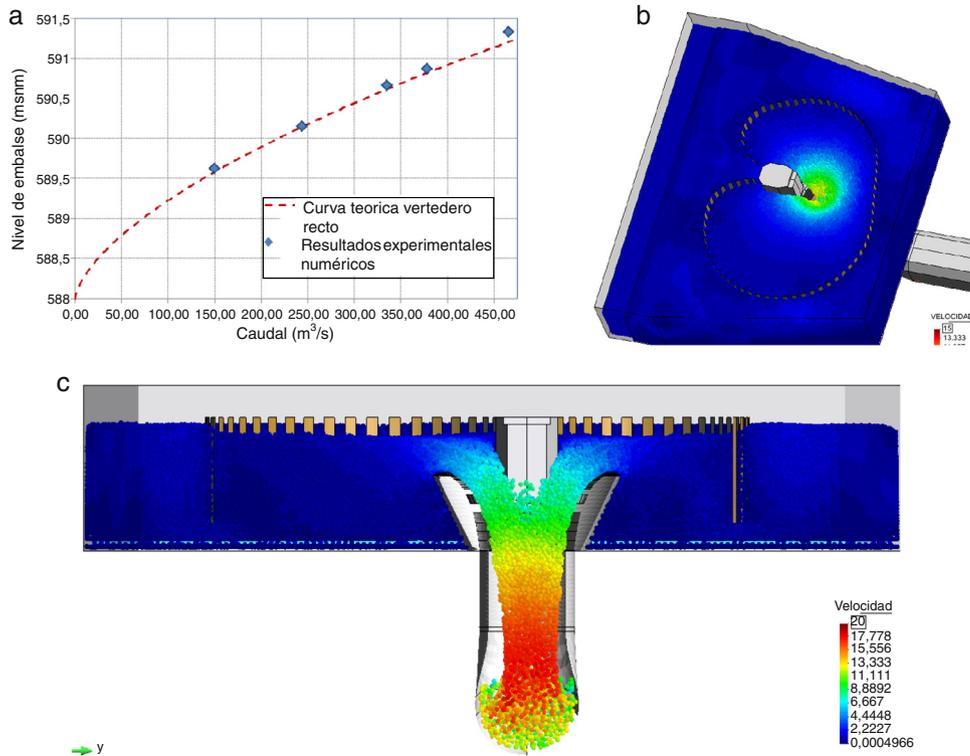
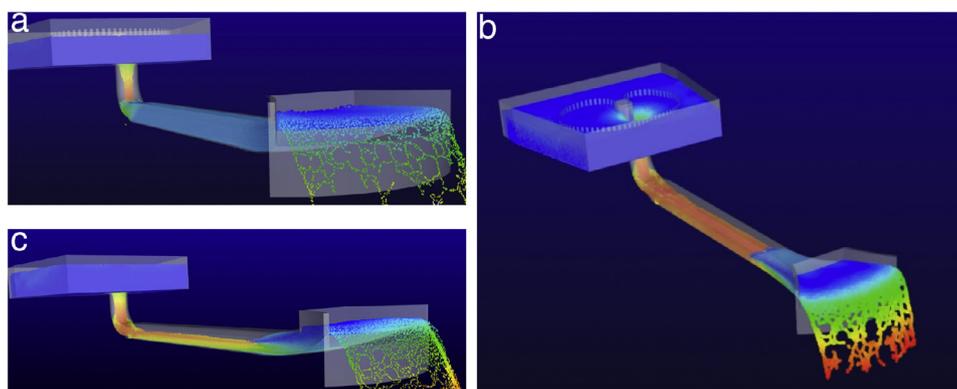


Figura 11. (a) Curva de capacidad del aliviadero para flujo controlado en el vertedero. (b) y (c) Detalles de funcionamiento para 378 m³/s.



**Figura 12.** Funcionamiento del aliviadero para diferentes caudales.

vertedero recto. De hecho, para los caudales de ensayo la relación  $H_e/R_s$  es lo suficientemente reducida como para que no se detecte el efecto de la curvatura.

Se aprecia el despegue del flujo de las paredes del pozo en las figuras 11c, 12a y 12c, posiblemente por una falta de guiado en el vertedero.

Los ensayos se han realizado partiendo de una condición inicial de galería llena. Sin embargo, la galería no se mantiene en carga para toda la gama de caudales, por lo que en función del caudal circulante se desplaza el frente del resalto. Finalmente, se ha comprobado que en el carrete de transición, a la salida del codo hacia la galería, se produce un despegue de lámina donde cabe esperar problemas de cavitación. La figura 12 ilustra estos aspectos.

Como consecuencia de lo anterior se están diseñando una serie de modificaciones en el vertedero, el carrete de transición entre codo y galería y en la estructura de salida, que serán validadas en el modelo numérico antes de su estudio definitivo en el modelo físico.

#### 4. Conclusiones

La modelación CFD de estructuras hidráulicas, basada en el método SPH, resulta de gran utilidad para analizar su comportamiento hidrodinámico. En primer lugar, permiten visualizar flujos muy complejos, posibilitan detectar problemas y facilitan un diseño más adecuado.

Los trabajos de calibración y estudio hidrodinámico del aliviadero han requerido realizar un gran número de ensayos ( $O. 10^2$ ), con tiempos de simulación de centenares de segundos para garantizar la estabilización de los caudales. Esto ha sido posible gracias a que el modelo SPHERIMENTAL incorpora técnicas de supercomputación sobre GPU.

Se propone un método para reproducir la condición de contorno de fricción añadiendo un término en la ecuación de las fuerzas de Lennard-Jones que ejercen una resistencia al flujo sobre las partículas que interactúan con el contorno. Así mismo, se presentan los valores del coeficiente de fricción calibrados para este estudio.

Es recomendable que aliviaderos tan complejos como este se estudien además en modelo físico, en cuyo caso la modelización

previa permite reducir los plazos de ejecución y, por ende, sus costes.

#### Anexo. Material adicional

Se puede consultar material adicional a este artículo en su versión electrónica disponible en [doi:10.1016/j.riba.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.03.001).

#### Bibliografía

- [1] Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics* 2005;68:1703–59.
- [2] Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 1992;30:543–74.
- [3] López D, Marivela R, Garrote L. Smooth particle hydrodynamics model applied to hydraulic structures: A hydraulic jump test case. *Journal of Hydraulic Research* 2010;48(Extra Issue):142–58.
- [4] Monaghan JJ. Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics* 1994;110:399–406.
- [5] Hugges JP, Graham DI. Comparison of incompressible and weakly-compressible SPH models for free-surface water flows. *Journal of Hydraulic Research* 2010;48(Extra Issue):105–17.
- [6] Gómez-Gesteira M, Rogers B, Dalrymple R, Crespo A. State-of-art of classical SPH for free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research* 2010;48(Extra Issue):6–27. ISSN: 0022-1686.
- [7] López D, Cuellar V. Paralelización CUDA del método SPH. Aplicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas. Comunicaciones de las III Jornadas de Ingeniería del Agua. Barcelona, Spain. ISBN: 978-84-267-2071-9.
- [8] Grassa JM. El método SPH. Aplicaciones en ingeniería marítima. *Revista de Ingeniería Civil* 2004;133:37–55.
- [9] Onderik J, Durikovic R. Efficient neighbor search for particle-based fluids. *Journal of Applied Mathematics, Statistics and Informatics (JAMSI)*. 2008;4:29–43.
- [10] IBM electric punched card accounting machines, principles of operation: Sorters types 82, 80, and 75; IBM Form 22-3177-1; 1949.
- [11] López D, Cuellar V, Díaz R. Corrección termodinámica de la difusión numérica del método WSPH. *Ingeniería del Agua* 2015;19.1:1–16.
- [12] Gottlieb S, Shu C. Total variation diminishing Runge-Kutta schemes. *Mathematics of Computation* 1998;67:73–85.
- [13] López D, Marivela R, Aranda F. Análisis hidrodinámico de estructuras hidráulicas con modelos SPH. Estudio del cuenco de amortiguamiento de la presa de Villar del Rey. Comunicaciones de las IX Jornadas Españolas de Presas. Valladolid, España; 2010. ISBN: 978-84-92626-68-7.
- [14] López D. SPH method applied to hydraulic structures. Friction boundary condition. Proceedings of 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal. ISBN: 978-989-8509-01-7.