

# ***Calibración del modelo SPH en aliviaderos con vertedero lateral y en cuencos de amortiguamiento. Comparación con el modelo físico de la presa de Terroba.***

## ***Tema M, Tema D***

*David López, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. [david.lopez@cedex.es](mailto:david.lopez@cedex.es)*

*Miguel de Blas, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. [miguel.blas@cedex.es](mailto:miguel.blas@cedex.es)*

*Rubén Díaz, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. [ruben.diaz@cedex.es](mailto:ruben.diaz@cedex.es)*

*Roberto Marivela, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. [roberto.marivela@cedex.es](mailto:roberto.marivela@cedex.es)*

*Juan José Rebollo, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. [juan.j.rebollo@cedex.es](mailto:juan.j.rebollo@cedex.es)*

*Irene Domingo, Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE. [idomingo@chebro.es](mailto:idomingo@chebro.es)*

## **RESUMEN**

El objeto de esta comunicación es exponer la calibración que se está realizando del modelo SPH para validar su aplicabilidad al estudio de aliviaderos con vertedero lateral y el análisis de estructuras de disipación de energía con cuenco de amortiguamiento. Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica se validarán con la experimentación en modelo físico. En concreto, con el modelo físico del aliviadero de la presa de Terroba (La Rioja), en el que se está realizando una campaña de medidas de presiones, velocidades y calados tanto en el canal de descarga como en el cuenco de amortiguamiento. Además se compararán las curvas de capacidad obtenidas mediante ambas modelizaciones.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La presa de Terroba se sitúa en el río Leza. El embalse que generará se encuentra entre los términos municipales de Soto de Cameros y Terroba. Se trata de una presa de materiales sueltos con pantalla asfáltica. La coronación queda a la cota 777.00 m.s.n.m. y a 45.6 m de altura sobre el plinto de apoyo de la pantalla. El cauce queda a la cota 740.00 m.s.n.m. El NMN está a la cota 772.00. La capacidad del embalse es de 8.2 Hm<sup>3</sup>.

El aliviadero se sitúa en la margen derecha de la presa. El umbral del vertedero queda a la cota 772.00 (NMN). Es de planta recta. Consta de un vertedero lateral de 60 m, constituido por un perfil Bradley de 2.2 m de altura de lámina. El vertedero alimenta un canal de pendiente 0.1%, de ancho variable de 7.5 a 15 m, hasta alcanzar el ancho del canal de descarga. Previamente a la entrada en el canal existe un tramo en curva de 50 m de radio, con la misma pendiente de 0.1%, que sirve de acuerdo entre las alineaciones del vertedero lateral y el canal de descarga. El canal tiene un primer tramo con pendiente del 53.8 %, tras una acuerdo vertical curvo de radio 20 m, el segundo tramo tiene una pendiente de 8.45 %. Entre ambos tramos se ha dispuesto un acuerdo vertical circular de 75 m. de radio. El tramo final de la rápida previo a la entrada al cuenco tiene un trazado en alzado circular de 22 m de radio. Como obra de restitución de los caudales vertidos al cauce se ha dispuesto un cuenco de amortiguamiento de 60 m. de largo por 20 m. de ancho, con solera a la cota 721 y dientes de solera dispuestos según un cuenco tipo II de las recomendaciones del Bureau of Reclamations.



Figura 1. Situación de la futura presa.

De acuerdo con el estudio hidrológico y de laminación del proyecto, los niveles y caudales de proyecto y de avenida extrema son:

Tabla 1. Niveles y caudales de proyecto y de avenida extrema.

Período de retorno	Caudal punta laminado	Cota de embalse
1000 años	412.2 m <sup>3</sup> /s	774.17 (NAP)
10000 años	683.6 m <sup>3</sup> /s	774.97 (NAE)

## 2. MODELO FÍSICO

Considerando las dimensiones de la obra, los caudales de ensayo y la experiencia de este Laboratorio en otros estudios análogos se ha adoptado como escala geométrica más adecuada  $\lambda=1/50$ , para la construcción del modelo tridimensional.

Teniendo en cuenta que la magnitud preponderante en estos fenómenos es la atracción gravitatoria, la semejanza hidráulica que se adopta para realizar el estudio mantiene el número adimensional de Froude invariante, por lo que las restantes escalas serán:

Tabla 2. Escalas para la construcción del modelo físico.

Superficie	$\lambda_s = \frac{1}{50^2}$
Volúmenes	$\lambda_v = \frac{1}{50^3}$
Velocidades	$\lambda_v = \frac{1}{\sqrt{50}}$
Tiempo	$\lambda_t = \frac{1}{\sqrt{50}}$
Caudales	$\lambda_Q = \frac{1}{50^{\frac{5}{2}}}$
Nº de Reynolds	$\lambda_{Re} = \frac{1}{50^{\frac{3}{2}}}$

Para garantizar la semejanza es preciso que la turbulencia este desarrollada, esto es, que el número de Reynolds sea suficientemente alto. Para el caudal de diseño (412 m<sup>3</sup>/s.) este número queda por encima de 77000, y supera los 28000 para caudales superiores a 150 m<sup>3</sup>/s, lo que se considera suficiente. En todo caso, los efectos de escala para los caudales inferiores no comprometen la validez del estudio.



Figura 2. Modelo físico de la presa de Terroba.



Como resultado de este estudio en modelo reducido se propusieron diferentes modificaciones en la definición del aliviadero y del cuenco de amortiguamiento, mejorando el funcionamiento hidráulico del conjunto.

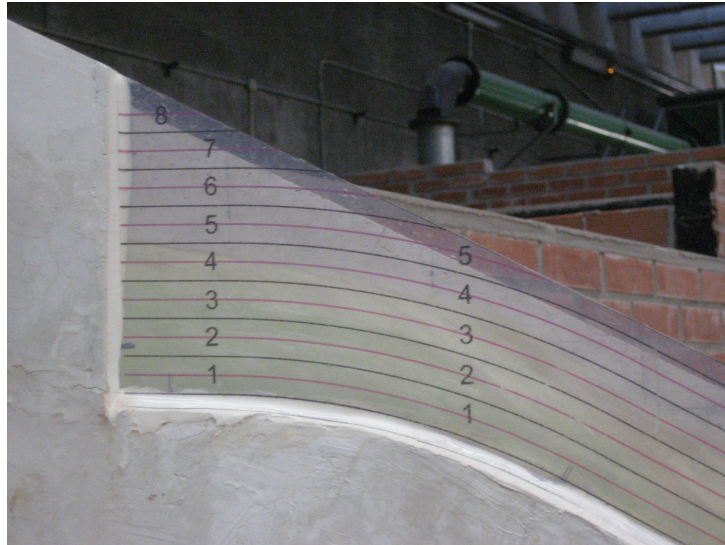


*Figuras 3 y 4. Solución inicial.  $Q=150\text{ m}^3/\text{s}$ .  $C_e=773.16\text{ m.s.n.m}$ . Vista del canal de descarga y cuenco de amortiguamiento.*



*Figura 5.  $Q=350\text{ m}^3/\text{s}$ .  $C_e=774.00\text{ m.s.n.m}$  Vista del labio y cántara de recogida del vertedero lateral.*

Actualmente, para la comparación con el modelo SPH, se han construido los laterales del canal de descarga y del cuenco de amortiguamiento con metacrilato, para que se puedan realizar mediciones precisas. Además, en el fondo del cuenco de amortiguamiento se han dispuesto una serie de sensores para registrar las presiones existentes y posteriormente poder contrastarlas con las obtenidas en el modelo SPH.



Figuras 6 y 7. Vista del canal de descarga y cuenco de amortiguamiento con metacrilato para las mediciones.

### 3. MODELO SPH

#### 3.1 Modelo MDST

Para el análisis del fenómeno en modelo matemático se ha empleado MDST (Grassa, 2004). Este modelo desarrollado en el CEDEX, es un modelo basado en el método SPH (Smoothed Particles Hydrodynamic), que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, considerando el agua como un fluido cuasi-incompresible, lo que permite integrar las ecuaciones con un esquema temporal explícito, resolviendo una ecuación de estado (Monaghan, 2005).

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (v_a - v_b) \cdot \nabla W_{ab} \quad 1)$$

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

$$p_i = \frac{\rho_0 c^2}{\gamma} \left( \left( \frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad 3)$$

Se ha tomado  $\gamma = 7$ . Puesto que la máxima velocidad previsible en el flujo es de 25 m/s se ha adoptado una velocidad del sonido  $c=300$  m/s lo que garantiza una compresibilidad del fluido inferior al 1% y permite adoptar mayores pasos de tiempo (Monaghan, 1992).

Para la interpolación de los valores de las variables de campo se ha empleado un spline cúbico.

Por simplicidad se ha empleado el modelo de viscosidad artificial de Monaghan.

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab} + \beta \mu_{ab}^2}{\bar{\rho}_{ab}}, & v_{ab} \cdot r_{ab} < 0 \\ 0, & v_{ab} \cdot r_{ab} > 0 \end{cases} \quad 4)$$

$$\mu_{ab} = \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{r_{ab}^2 + (0.1h)^2} \quad 5)$$

Con  $\alpha = 0.01$  y  $\beta = 0$ , que son valores habituales en flujos en superficie libre.

Empleando modelos de turbulencia más complejos (Violeau, 2007) se obtienen resultados más ajustados, pero dado el tamaño del problema abordado, el coste computacional resulta excesivo. No obstante, se pretende completar este estudio con esta línea de trabajo.

Para poder abordar estudios con un número de partículas elevado, se ha realizado un esfuerzo importante en el CEDEX, (Grassa, 2007) en materia de supercomputación desarrollando una nueva versión del código en arquitectura paralela con paradigma MPI que ha permitido reproducir este fenómeno en 3D.

### 3.2 Discretización de los contornos y fluido.

Para reproducir los fenómenos hidráulicos se ha reproducido un modelo digital igual al modelo físico de la presa de Terroba. Los contornos se han materializado con 1500000 partículas fijas de 0.15 m, que ejerce una fuerza de repulsión de Lennard-Jones por unidad de masa sobre las partículas de fluido que se aproximan, evitando que estas salgan.

$$f(r) = d_0 \left( \left( \frac{r_0}{r} \right)^{p_1} - \left( \frac{r_0}{r} \right)^{p_2} \right) \frac{\vec{r}}{r^2} \quad 6)$$

Para reproducir el agua se han empleado 1500000 partículas de fluido de 0.50 m. Además se ha optimizado el sistema de recirculación del flujo eliminando la necesidad de la representación de contornos para el mismo. Para el diseño del modelo hemos empleado el software de pre y postproceso, GiD desarrollado por CIMNE.

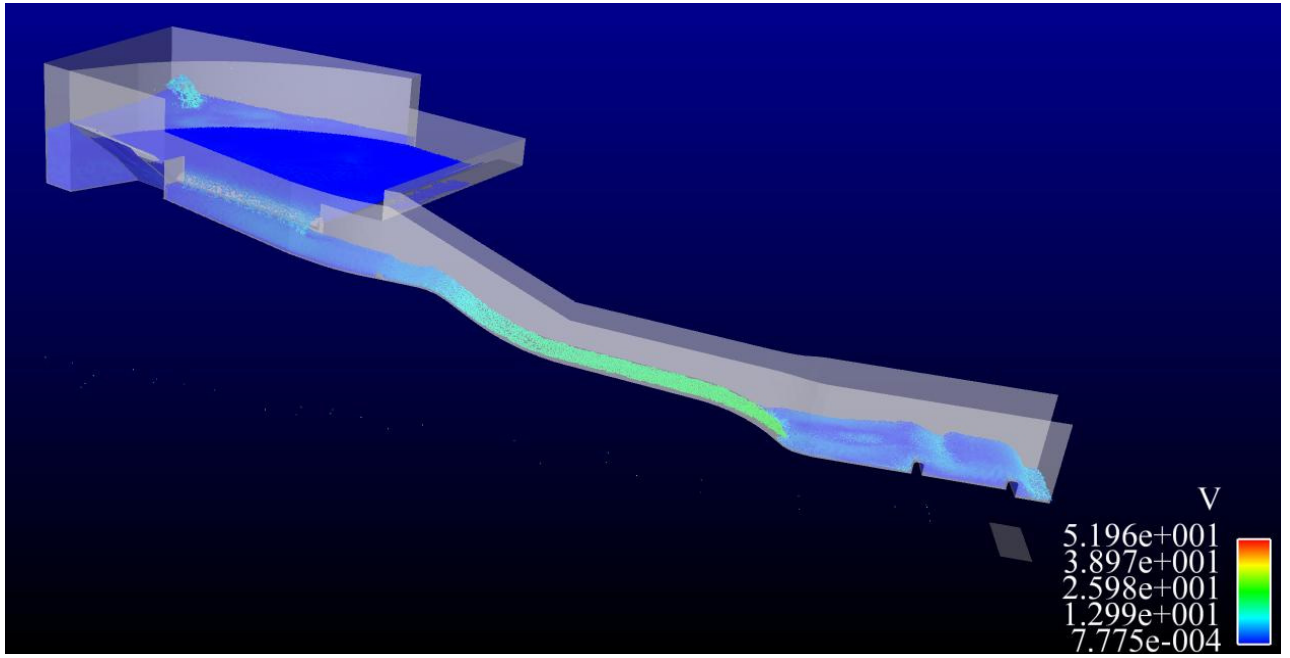


Figura 8. Modelo SPH de la presa de Terroba.

Es práctica habitual reproducir el contorno disponiendo las partículas del contorno más próximas que las de fluido para evitar que éstas lo atraviesen, normalmente a la mitad de la distancia o menos. Sin embargo esto supone incrementar el número de partículas excesivamente. En este estudio, la distancia entre las partículas de contorno es algo mayor y para suplir esta carencia, se ha empleado una constante  $d_0=100$ .

### 3.3 El ensayo numérico.

Como condición inicial se ha impuesto un régimen hidrostático de presiones. Hasta que se alcanza el equilibrio dinámico entre las partículas se produce un transitorio inicial con oscilaciones de presión. Hay que realizar ensayos de larga duración, antes de llegar al equilibrio dinámico.

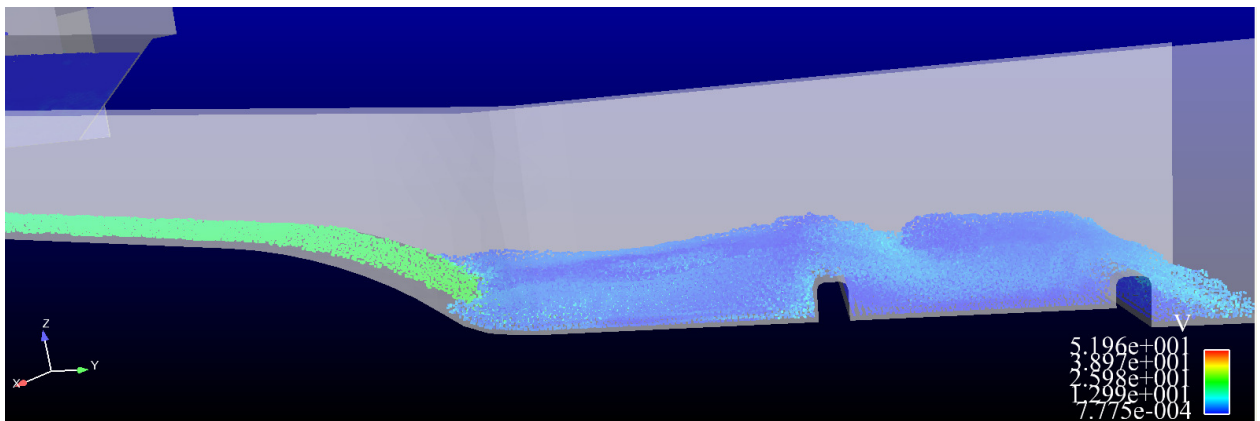


Figura 9. Detalle del cuenco de amortiguamiento del modelo SPH de la presa de Terroba.



### 3.4 Registro de presiones.

Para obtener el registro de presiones en los mismos puntos que en el modelo físico, se generan, por cada sensor en el modelo SPH, una serie temporal en la que se acumula la fuerza que experimentan las partículas del contorno que se encuentran en un círculo de área de un metro cuadrado y centro el correspondiente a las coordenadas de cada sensor. Sin embargo, esto sólo permite calcular las presiones positivas generadas por las fuerzas repulsivas ejercidas para que las partículas de fluido no atraviesen el contorno, pero no las depresiones. Para calcularlas se consideran en el cálculo las partículas de fluido que se alejan del contorno, y que por tanto producen una depresión sobre éste.

## 4. ESTADO ACTUAL DEL ESTUDIO

Actualmente se están recopilando datos de los sensores del modelo físico y se están depurando los registros obtenidos en el modelo SPH, para a continuación analizar y contrastar los resultados de ambos modelos y obtener las conclusiones de este estudio.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**GRASSA, J.M.** (2004). El método SPH. “Aplicaciones en Ingeniería marítima”. Revista de Ingeniería Civil, 133.

**LÓPEZ, D., DÍAZ, R.** (2010). “Estudio hidráulico mediante modelo físico a escala reducida del aliviadero de la presa de Terroba (La Rioja)” Centro de Estudios Hidrográficos (C.E.H.), CEDEX.

**LÓPEZ, D., MARIVELA, R., ARANDA F.** (2009). “Calibration of SPH model using prototype pressure data from the stilling basin of the Villar del Rey dam, Spain”. 33<sup>rd</sup> Congress of IAHR. Water Engineering for a Sustainable Environment The International (Vancouver 9-14 de agosto de 2009), ISBN: 978-90-78046-08-0.

**LÓPEZ, D., MARIVELA, R., GARROTE L.** (2010). “Smoothed Particle Hydrodynamics Model Applied To Hydraulic Structures: A Hydraulic Jump Test Case”. Journal of Hydraulic Research. Vol 48. , Extra Issue (2010), pp. 142-158. ISSN: 0022-1686.

**MONAGHAN, J.J.** (1992). “Smoothed particle hydrodynamics”. Annual review of astronomy and astrophysics, 30, 543–574.

**MONAGHAN, J.J.** (1994). “Simulating free surface flows with SPH. Journal of Computational Physics”, 110, 1-15.

**VIOLEAU, D., ISSA, R.** (2007). “Numerical modelling of complex turbulence free-surface flows, with the SPH method: an overview. International Journal for Numerical Methods in Fluids 2007; 53:277-304.