

Análisis de los efectos hidráulicos asociados a la colocación de una compuerta inflable sobre un aliviadero mediante modelación física y numérica (CFD)

Analysis of the hydraulic effects associated to the location of an inflatable rubber weir over a spillway profile through experimental and numerical (CFD) model

Díaz, S.

Universidad de Castilla-La Mancha, ETSI Caminos, Canales y Puertos Ciudad Real, Departamento de Ingeniería Civil y Construcción. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071-Ciudad Real (España). E-mail: Sarai.Diaz@uclm.es.

Recibido: 03/03/2015

Aceptado: 22/04/2015

Publicado: 28/04/2015

RESUMEN

La facilidad de las compuertas inflables para adaptarse a distintas condiciones de flujo las hace interesantes para su ubicación en vertederos de presa, permitiendo aumentar el volumen embalsado en explotación ordinaria, y permitiendo el desinflado y restauración de la geometría original en situación extraordinaria. El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la colocación de una compuerta inflable sobre un aliviadero en lo que respecta a su comportamiento hidráulico. Para ello, se desarrollan un modelo físico y un modelo numérico (CFD) del cuerpo de un aliviadero WES original, incorporándose luego una compuerta EPDM cuyo efecto se analiza para distintos niveles de inflado. Los resultados numéricos y experimentales son similares y ponen de manifiesto variaciones significativas en la distribución de presiones a lo largo del vertedero, siendo determinante la aireación. Este estudio concluye que la colocación de esta compuerta particular tiene un efecto global positivo si se realiza convenientemente, pero se requieren estudios adicionales con diferentes geometrías para profundizar en algunos aspectos negativos.

Palabras clave | compuerta inflable; aliviadero; CFD; modelación experimental; aireación bajo chorro.

ABSTRACT

The ease of rubber weirs to adapt themselves to different flow conditions makes them interesting for placement over spillway profiles, allowing to increase the stored volume in ordinary operation without compromising the dam's response in case of flooding. The objective of this study is to analyze the effect of locating an inflatable weir over a spillway profile in what regards its hydraulic response. With this purpose, an experimental and a numerical CFD model of a WES original spillway profile are developed, to then include an EPDM weir whose effect is analyzed for different inflation levels. Numerical and experimental results are close and highlight significant variations in the pressure distribution along the spillway, with aeration playing a significant role. This study concludes that the placement of this particular inflatable weir has an overall positive result if conveniently undertaken, but additional studies with different geometries are required to delve in the topic.

Key words | inflatable weir; spillway profile; CFD; experimental model; under water jet aeration.

INTRODUCCIÓN

Las compuertas inflables son estructuras de interés en el ámbito de la ingeniería hidráulica debido a su facilidad de construcción, colocación y operación (Cheraghi-Shirazi *et al.*, 2014). Su principal ventaja radica en su comportamiento flexible, que permite su inflado o desinflado en función de las condiciones de flujo y las condiciones impuestas por el explotador de las compuertas. Esto les permite adaptarse a una gran cantidad de situaciones, siendo la versatilidad su característica más destacable. Además, no se corroen y se consideran más económicas que las estructuras de control de acero u hormigón (Zhang *et al.*, 2002). Estas ventajas han fomentado su expansión por el mundo, principalmente en Asia y particularmente en Japón.

En las últimas décadas, las compuertas inflables se han colocado en ríos y estuarios para fomentar la acumulación de agua, para prevenir la dispersión de contaminantes y para permitir la derivación de agua con fines hidroeléctricos, el control de inundaciones o el riego, entre otros muchos usos (Watson *et al.*, 1999). Paralelamente, su uso como estructuras complementarias también se ha ido difundiendo, ya que, por ejemplo, pueden ser utilizadas para elevar el nivel en presas existentes, incrementando la capacidad del embalse sin comprometer la respuesta de la presa en caso de crecida. En este respecto, se han instalado compuertas inflables en el vertedero de la Presa de Pit 3 (California, Estados Unidos) y de la Presa de Koombooloomba (Ravenshoe, Australia), entre otras. Este tipo de intervenciones se suelen desarrollar a posteriori, durante la vida útil de la presa (Chanson, 1997), por ejemplo como respuesta a una variación del régimen hidrológico o un cambio en la política de explotación. La particularidad de esta aplicación radica en que la superficie de apoyo de la compuerta es curva, quedando expuesta la membrana a flujos de alta velocidad, propios de vertederos de presa (Novak *et al.*, 2007). Debido al potencial de la aplicación y a la responsabilidad que recae sobre los vertederos en términos de seguridad de la presa, es indispensable analizar el efecto de la colocación de la compuerta inflable en el vertedero, objeto del presente estudio. En concreto, se evaluarán escenarios asociados a la colocación de compuertas inflables reguladas con aire, ya que la mayoría de las presas inflables se construyen en la actualidad de este tipo (Alhamati *et al.*, 2005).

Las condiciones de flujo asociadas al sobrevertido sobre compuertas inflables infladas y desinfladas han sido analizadas en estudios previos, aunque todos ellos asumen la superficie de colocación horizontal. En lo que respecta al flujo sobre compuerta desinflada, Chanson (1997) analiza diversas situaciones de inestabilidad inducida y señala que no pueden ser sometidas a importantes presiones negativas ni a esfuerzos tangenciales en dirección normal o contraria al flujo, ya que esto haría peligrar su integridad. En lo que respecta al flujo sobre la compuerta inflada, se han llevado a cabo diversos estudios para valorar la interacción estructura-fluido (Shepherd *et al.*, 1969; Binnie *et al.*, 1973), para definir la evolución de la lámina sobre la compuerta (Chanson, 1998) y para determinar el coeficiente de descarga sobre la compuerta inflada (Anwar, 1967; Alwan, 1979; Al-Shami, 1983; Alhamati *et al.*, 2005, etc.), existiendo disparidad de resultados en este último respecto. Además, se han desarrollado investigaciones para analizar las formas de equilibrio que este tipo de estructuras flexibles pueden adoptar (Watson *et al.*, 1999; Alhamati *et al.*, 2005). Más recientemente, se han desarrollado estudios numéricos para reproducir este mismo fenómeno en condiciones estacionarias y bajo distintos escenarios de sobrevertido (Hassler and Schweizerhof, 2008; Ghavanloo and Daneshmand, 2010; Cheraghi-Shirazi *et al.*, 2014). Estas implementaciones pretenden resolver la compleja dependencia existente entre las propiedades de la membrana, su presión interior y las condiciones de flujo asociadas, lo cual requiere avanzados modelos numéricos asociados a un importante coste computacional.

Sin embargo, el denominador común a todo este trabajo se centra en las particulares solicitaciones a las que se ve sometida la compuerta inflable como resultado de unas condiciones de flujo dadas. Este análisis permite una mejor comprensión de los fenómenos asociados a la colocación de una compuerta inflable, pero debe ser complementado para garantizar la instalación segura (o al menos bien fundamentada) de compuertas inflables sobre vertederos de presa. Por ello, en este trabajo se evalúa el efecto asociado a la colocación de una compuerta inflable (controlada por aire) sobre un vertedero tipo WES original (Khatsuria, 2004), estudiando cómo esta pieza adicional puede afectar a la estructura principal. Para ello, se desarrollan un modelo reducido y un modelo numérico basado en la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF, típicamente referida por su acrónimo en inglés CFD, *Computational Fluid Dynamics*), siendo el objeto del segundo analizar las condiciones de flujo al detalle para las posiciones críticas de la compuerta, evitándose así la necesidad de un modelo numérico más complejo que reproduzca la Interacción Fluido-Estructura (IFE, del inglés FSI, *Fluid-Structure Interaction*). Ambos modelos analizan el aliviadero desnudo, así como el efecto de colocar la compuerta, permitiendo probar bajo diferentes escenarios de sobrevertido la evolución de presiones a lo largo del paramento y los coeficientes de descarga asociados.

La organización del trabajo es la siguiente. En el apartado de Material y Métodos se detallarán las particularidades de los modelos físico y numérico utilizados para reproducir la realidad de la presa y la colocación posterior de la compuerta inflable. Posteriormente, en el apartado de Resultados y discusión de los mismos se expondrán los resultados experimentales y numéricos obtenidos para, finalmente, deducir las Conclusiones asociadas. Este trabajo muestra una buena correspondencia entre los resultados del modelo numérico y experimental, extrayéndose varias conclusiones que pueden ser de interés para futuras investigaciones y/o aplicaciones, como es el positivo efecto de la aireación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Modelo físico

Para analizar los efectos hidráulicos asociados a la colocación de una compuerta inflable en un vertedero de presa, se construye un modelo reducido con semejanza de Froude, a escala 1:33. Originalmente, el modelo consiste en el cuerpo de un aliviadero tipo WES con paramento vertical aguas arriba y una altura de diseño (H_d) de 7 m en el prototipo (21.2 cm en el modelo), fabricado en PVC. El modelo reducido presenta un único vano de 70.3 cm de anchura (23.2 m en prototipo), limitado por paredes de metacrilato a ambos lados, tal y como muestra la Figura 1. La profundidad adoptada aguas arriba del aliviadero es tal que el ratio de la profundidad respecto a la altura de diseño del aliviadero resulte superior a 3, pudiendo considerarse así despreciables los efectos de fondo (Bureau of Reclamation, 1987).

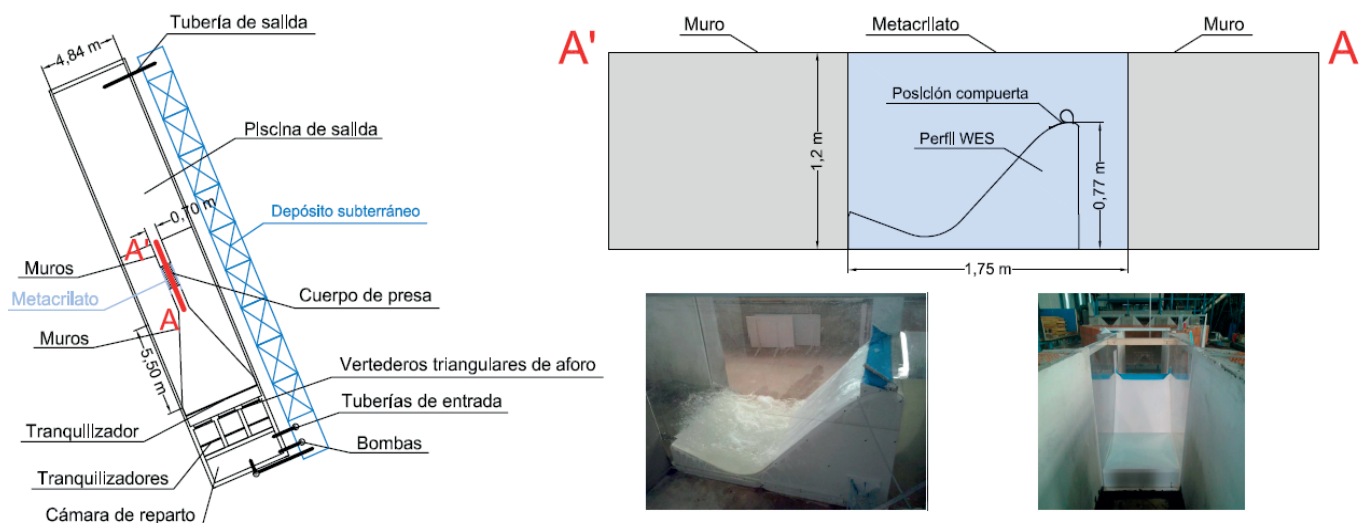


Figura 1 | Montaje experimental: definición de conjunto del modelo.

Adicionalmente, se ha colocado una compuerta inflable a lo largo de su ancho, encontrándose el anclaje de la misma al paramento 2.4 cm aguas arriba de la cresta del vertedero en el modelo (0.8 m en el prototipo), tal y como muestra la Figura 2. Es importante matizar que la compuerta no se extiende a lo largo de la longitud total del vano, puesto que además de la instalación de la compuerta es necesario colocar un recrecimiento en un lateral (0.9 cm de ancho en el modelo, 0.3 m en el prototipo) para reproducir el espacio reservado a la instalación de los dispositivos de inflado y desinflado, que típicamente engrosan las pilas en la instalación de estas estructuras (Gebhardt, 2006). Por su parte, la membrana se encuentra fijada a este recrecimiento y a la otra pared de metacrilato mediante un anclaje que forma 35° con la horizontal, reposando la compuerta en su posición desinflada sobre sendos prismas triangulares que se colocan en los extremos del vano, facilitando la aireación. La membrana es EPDM de 0.4 mm de espesor (13 mm en el prototipo) y presenta una longitud total de 28.5 cm (9.4 m en el prototipo), lo cual se traduce en 14.2 cm de anchura de compuerta (4.7 m en el prototipo) cuando ésta se encuentra desinflada.

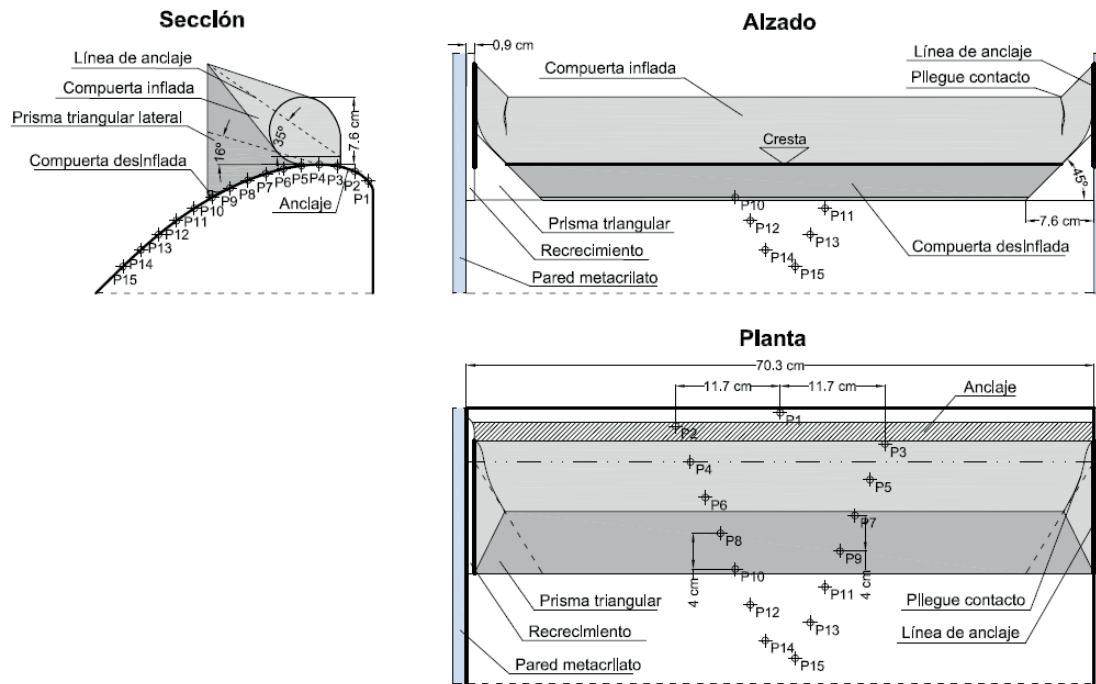


Figura 2 | Montaje experimental: colocación de la compuerta sobre el cuerpo del aliviadero y posición de los puntos de medida de presión.

Con el objeto de controlar la evolución de las presiones a lo largo del paramento, se instalan dispositivos de medida de presión en la parte central del aliviadero, cada 2 cm (0.66 m en el prototipo) en la dirección del flujo y al tresbolillo, tal y como muestra la Figura 2. El primer punto de medida de presión se encuentra al terminar el paramento vertical aguas arriba (P1) y el último punto se encuentra aproximadamente 10 cm (3.3 m en el prototipo) aguas abajo del extremo final de la compuerta desinflada (P15). La medida de presión en cada uno de estos puntos se garantiza por el principio de los vasos comunicantes, pues la presión atmosférica se impone en el extremo del tubo exterior al modelo, donde se mide la altura de presión asociada. La presión se mide en cada uno de los puntos de control para los diferentes niveles aguas arriba probados en cada uno de los casos considerados, que se corresponden con el aliviadero en su situación original y las situaciones asociadas a la colocación de la compuerta, tanto desinflada como inflada al 25, 50, 75 y 100%. En este respecto, se debe matizar que el nivel de inflado de la compuerta se determina en función de la altura de la compuerta inflable con respecto a su altura de diseño máxima (7.6 cm, 2.5 m en el prototipo), ya que es práctica habitual que cuando estas estructuras se colocan en vertederos de presa, su operación se establezca en términos del nivel en el embalse (Gebhardt, 2007), que debe mantenerse lo más alto posible incluso durante la evacuación de la avenida para optimizar su explotación. Por tanto, los niveles de inflado del 25, 50 y 75% se corresponden con alturas de compuerta de 1.9, 3.8 y 5.7 cm en el modelo (0.63, 1.25 y 1.88 m en el prototipo), que serán conseguidos para diferentes niveles aguas arriba por medio de la regulación de una válvula de aire.

Como se ha comentado anteriormente, también es interesante analizar el efecto de la colocación de la compuerta y los elementos adicionales requeridos para su instalación (recrecimiento, prismas, etc.) en el coeficiente de descarga del vertedero, así como su variación en función del nivel de inflado. En este sentido, el coeficiente de descarga adimensional (C_d) se estima en función del caudal específico (q) de entrada al modelo (medido aguas arriba) y la altura de sobrevertido (ΔH), conforme a la siguiente expresión, propia de vertederos:

$$C_d = \frac{3q}{2\sqrt{2g\Delta H^3}} \quad (1)$$

Es importante resaltar el hecho de que la altura de sobrevertido ($\Delta H = H - H_0$) se determina con respecto al umbral para el que comienza a producirse el vertido (H_0), el cual variará para los diferentes niveles de inflado considerados. En este respecto, el nivel de energía H se mide en el modelo con un limnómetro colocado 1 m aguas arriba de la cresta del vertedero para evitar el efecto del aumento de velocidades en las proximidades del aliviadero, y el umbral variará para cada caso considerado (aliviadero original, compuerta desinflada y compuerta inflada para distintos niveles de inflado). En este trabajo, el sobrevertido varía entre hasta 28.8 cm (9.5 m a escala de prototipo) para el caso del vertedero con membrana desinflada (aproximadamente un 36% superior a la altura de diseño) y hasta 9.1 cm (3 m a escala de prototipo) para las situaciones con la membrana total o parcialmente inflada, ya que se asume como regla de operación mantener +0.5 m a escala de prototipo con respecto al punto más elevado de la compuerta. Finalmente, los coeficientes de descarga obtenidos serán comparados con los propuestos en la literatura para escenarios de compuerta inflada (Anwar, 1967; Alwan, 1979; Al-Shami, 1983).

Modelo numérico

El objetivo del modelo numérico es reproducir los fenómenos de flujo que se producen en la estructura a tamaño real, permitiendo corroborar los resultados del modelo físico (escalados) y evaluar posibles efectos particulares difíciles de apreciar en un modelo experimental, como el fenómeno de la aireación. Como se mencionaba anteriormente, y puesto que la compuerta se encuentra ubicada sobre el vertedero, un modelo que simule la interacción sólido-estructura resultaría interesante. Sin embargo, su implementación conllevaría un elevado coste computacional, especialmente para una estructura de tales dimensiones, por lo que se opta por simular mediante modelos numéricos CFD “fijos” convencionales las posiciones críticas de la compuerta, que pueden determinarse en base al modelo experimental. En este respecto, como luego se expondrá, los resultados del modelo físico ponen de manifiesto que la situación más desfavorable corresponde a la compuerta desinflada, asociado a significativas depresiones sobre el paramento de la presa. No obstante, también se ejecuta un modelo CFD de la realidad original del aliviadero desnudo y colocando sobre él la compuerta totalmente inflada. Esta simplificación “rígida” permite reducir considerablemente el coste computacional, contribuyendo igualmente a comprender los efectos hidráulicos asociados a la colocación de la compuerta.

La utilización de un modelo CFD implica la modelización matemática y resolución numérica de las ecuaciones de gobierno para el flujo, que son numéricamente aproximadas en miles de puntos discretos dentro un dominio físico que representa el problema real. Para este caso particular, el modelo numérico se implementa en el código comercial CFX 12.0, de Ansys Inc. Las características del modelo se presentan a continuación.

- a) Modelo multifase. Ansys CFX es un software que emplea volúmenes finitos para su discretización y que incorpora una variable adicional, denominada fracción en volumen (r), para identificar la ocupación de los fluidos que intervienen (en este caso, agua y aire) en cada una de las celdas. Así, una fracción en volumen igual a 1 indica que el elemento se encuentra ocupado por completo por agua, y 0 indica que no hay agua presente, es decir, que la celda se encuentra totalmente llena de aire. De esta forma, es posible localizar la superficie libre en aquellas celdas en las que la fracción en volumen sea 0.5, lo cual indica la presencia de una misma cantidad de agua y aire en el elemento. Esta simplificación por medio de la fracción en volumen permite asumir el mismo campo de flujo (velocidad, presión, turbulencia, etc.) para el agua y el aire, dando lugar a un modelo denominado homogéneo que no es más que una aproximación euleriana que simplifica la resolución numérica del problema, evitando tener que resolver de forma independiente las ecuaciones asociadas a cada fluido (modelo no homogéneo). Adicionalmente, se adopta un esquema de discretización compresivo para la advección para conseguir una mejor definición del contacto agua-aire.

De este modo, tal y como muestra la Ecuación (2), el campo de velocidades U^i de cada fase α y β (que se corresponden respectivamente con agua y aire) asumiendo un modelo homogéneo es el mismo:

$$U_\alpha^i = U_\beta^i = \sum_\alpha r_\alpha U_\alpha^i = U^i \forall \alpha \quad (2)$$

Esta asunción permite resolver una única ecuación de momento de acuerdo con la Ecuación (3):

$$\frac{\partial(\rho U^i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U^j U^i)}{\partial x^j} = -\frac{\partial p}{\partial x^i} + \rho g^i + \frac{\partial \tau^{ji}}{\partial x^j} \quad (3)$$

donde p representa la presión actuando en cada celda, ρ la densidad del fluido y τ el esfuerzo cortante. Debido a la coexistencia de agua y aire en algunas celdas, ρ y τ se obtienen ponderando cada celda por la fracción en volumen que representa cada fluido, tal y como muestran las Ecuaciones (4) y (5) respectivamente:

$$\rho = \sum_{\alpha} r_{\alpha} \rho_{\alpha} \quad (4)$$

$$\tau^{ji} = \sum_{\alpha} r_{\alpha} \tau_{\alpha}^{ji} \quad (5)$$

Paralelamente, la ecuación de continuidad de cada fase viene dada por la Ecuación (6) si se considera que los fluidos son incompresibles:

$$\frac{\partial U^j}{\partial x^j} = 0 \quad (6)$$

Finalmente, se debe establecer que la suma de las fracciones en volumen de ambos fluidos sea uno en cada celda, condición impuesta por la Ecuación (7):

$$\sum_{\alpha} r_{\alpha} = 1 \quad (7)$$

b) Modelo de turbulencia. Se implementa el modelo k- ϵ , ya que aunque el k- ω SST (del inglés, *Shear Stress Transport*) es la opción más completa para modelar flujos turbulentos hoy día (Bardina *et al.*, 1997), el modelo k- ϵ consiente un mallado menos fino y ha probado ser consistente en otros estudios desarrollados por Karimpour *et al.* (2011), Feurich y Olsen (2012), Soares *et al.* (2013), entre otros. Concretamente, se adopta con funciones de pared escalables, que modelizan el flujo próximo a la pared utilizando funciones que fuerzan perfiles logarítmicos en la capa límite. El modelo k- ϵ emplea la siguiente expresión (Ecuación (8)) para el transporte escalar de la energía cinemática turbulenta k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^i}(\rho \bar{U}^i k) - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x^i} = P - \rho \epsilon \quad (8)$$

donde σ_k es el número de Prandtl (típicamente considerado 1), P se refiere a la producción de cortante y viene dada por la Ecuación (9), y ϵ es la disipación de energía turbulenta, dada por la Ecuación (10):

$$P = \frac{1}{2} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}^i}{\partial x^j} + \frac{\partial \bar{U}^j}{\partial x^i} \right)^2 \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \quad (10)$$

donde l es la longitud para la disipación de la turbulencia y μ_t es la viscosidad turbulenta, dada por la Ecuación (11):

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

con $C_{\mu} = 0.09$.

De forma similar, la Ecuación (12) se refiere al transporte escalar de la disipación de energía turbulenta ϵ :

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^i}(\rho \bar{U}^i \epsilon) - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x^i} = \frac{\epsilon}{k} (C_1 P - C_2 \rho \epsilon) \quad (12)$$

donde los valores estándar recomendados son $\sigma_{\epsilon} = 1.3$, $C_1 = 1.44$ y $C_2 = 1.92$.

c) Geometría, mallado y condiciones de contorno. Con el objeto de minimizar el coste computacional, se adopta una simplificación 2D del dominio de flujo asignando 1 cm a cada celda en la dirección del eje de la presa. Esta simplificación reproduce la realidad del modelo físico en su parte central, es decir, en una rebanada genérica que no se ve afectada por la presencia de las paredes, los prismas de apoyo, ni los anclajes laterales. En todo caso, el dominio resultante es extenso, pues además de las dimensiones del aliviadero se requiere una altura adicional para reproducir el sobrevertido. Por ello, la geometría de cada uno de los tres casos (aliviadero en su situación original y compuerta desinflada e inflada) se define minimizando las dimensiones pero garantizando una modelación adecuada del flujo. Más aún, se ha considerado una profundidad de embalse menor que para el modelo físico (18.5 m a escala de prototipo, 0.56 m a escala de modelo) con el objeto de reducir el coste computacional, suponiendo esta simplificación una reducción del coeficiente de descarga por efecto del fondo inferior al 0.1% (Bureau of Reclamation, 1987), que se ha considerado despreciable.

Así pues, comenzando por la definición de la altura del dominio, tal y como se comentaba en el apartado relativo al Modelo físico, la política de operación asumida requiere que se puedan alcanzar 3 m por encima de la cresta del vertedero en operación ordinaria (membrana inflada) y hasta 9.5 m en caso de avenida (compuerta desinflada y aliviadero original). Además, se deben incluir al menos 0.5 m adicionales para permitir la presencia y circulación de aire por encima de la lámina libre. Por tanto, resultan modelos de 28.5 m de altura para el modelo numérico correspondiente al aliviadero desnudo y al de la compuerta desinflada, y basta con 22.5 m para reproducir el comportamiento de la compuerta totalmente inflada. En lo que respecta a la longitud del modelo, es importante reproducir el rápido cambio de régimen subcrítico a supercrítico que se produce en el entorno de la cresta del aliviadero. En este sentido, se disponen 20 m adicionales aguas arriba de la cresta del vertedero en todos los escenarios y 9 m aguas abajo para los modelos del aliviadero desnudo y con compuerta inflada. Sin embargo, se adoptan 23 m aguas abajo para el modelo con compuerta desinflada, ya que se espera que la presencia del doblez de la compuerta produzca un lanzamiento del chorro de agua, que impactará en el paramento de la presa tanto más aguas abajo cuanto mayor sea la altura de sobrevertido. De esta forma, los modelos resultantes presentan unas dimensiones de 29 m×28.5 m para el caso del aliviadero original, de 43 m×28.5 m para el modelo de la compuerta desinflada y de 29 m×22.5 m para el de la compuerta inflada, tal y como muestra la Figura 3, donde también se pueden ver las geometrías asumidas para la compuerta y la geometría del perfil del modelo físico a escala de prototipo. No obstante, la forma es altamente dependiente de las propiedades mecánicas del EPDM utilizado.

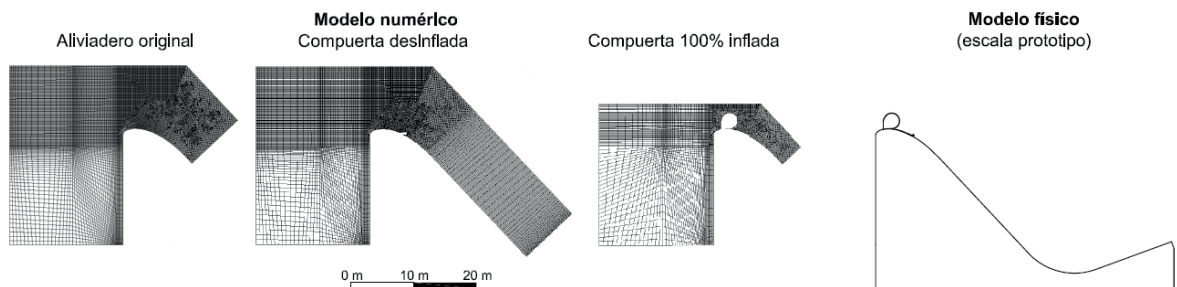


Figura 3 | Geometría y mallado de los modelos CFD. Comparación con la geometría del modelo físico.

En lo que respecta al mallado, y debido a la rápida transición en las proximidades de la cresta del vertedero, la malla se debe refinar en sus proximidades. Para ello se emplea un mallado hexaédrico de tamaño de celda variable que permite delimitar con éxito los elementos curvos que definen el dominio. En concreto, se adoptan celdas hexaédricas de tamaño máximo 10 cm en las proximidades de esta zona crítica, desarrollándose una transición gradual hasta alcanzar celdas de tamaño 1 m en el fondo del embalse en su extremo más aguas arriba. Tal y como se puede ver en la Figura 3, el refinamiento también se mantiene por encima de la cresta, garantizando una buena definición de la lámina libre para los distintos sobrevertidos considerados. Gracias a esta estrategia se llega a los tres mallados arriba mostrados, que presentan 27439 elementos para el caso del aliviadero desnudo, 29548 para el modelo de la compuerta desinflada y 10109 para el de la inflada. Además, se han desarrollado con éxito pruebas de independencia del mallado.

Finalmente, las condiciones de contorno deben reproducir el problema físico que se pretende simular. Por ello, es imprescindible definir sendas paredes del modelo (frontal y trasera) como de simetría para simular que se trata de una rebanada (2D). Por su parte, la condición de entrada se establece en base a la presión hidrostática, definida en función del nivel aguas arriba para cada uno de los distintos escenarios. La condición de salida se establece como supercrítica y a presión atmosférica, definiéndose el contorno agua abajo perpendicular al paramento de la presa para minimizar el efecto de la condición de contorno en las proximidades. En lo que respecta al aire, en el contorno superior del modelo se impone presión atmosférica (condición tipo *opening*) para reproducir la presencia de la atmósfera por encima del dominio. La rugosidad asignada al fondo del embalse y a los paramentos del vertedero es de 3 mm, ya que este valor es consistente con las observaciones experimentales y se adopta con frecuencia para reproducir el hormigón (Andersson *et al.*, 2013). Sin embargo, la superficie de la membrana se considera lisa debido a la baja rugosidad asociada al EPDM. Por último, como ya se ha mencionado, es importante reproducir el lanzamiento del chorro que tiene lugar cuando la compuerta desinflada reposa sobre el vertedero. En este sentido, es necesario ser conscientes de que en esta simplificación 2D no se está reproduciendo la posibilidad de entrada de aire por debajo de la lámina, lo cual sí que sucede en el modelo físico gracias al recrecimiento lateral y la presencia de los prismas triangulares. Con este fin, se abre un *opening* de 3 m de longitud en el paramento aguas abajo del modelo con la compuerta desinflada inmediatamente aguas abajo de su doblez final, ya que la imposición de presión atmosférica en este tramo permite la entrada de suficiente aire como para posibilitar que el chorro se lance desde la compuerta y no permanezca adherido al paramento. La dimensión de esta apertura se establece gracias a las observaciones experimentales, no impactando el chorro para ninguno de los niveles de sobrevertido simulados en esta zona artificial.

- d) Estrategia de resolución. Ansys CFX 12.0 trabaja con un algoritmo “a pares” (*coupled*) para resolver simultáneamente el campo de presiones y velocidades. Por otro lado, el software implementa un Método de Control de Volúmenes Finitos (CVFEM, del inglés, *Control Volume Finite Element Method*), que es un método de resolución exigente que debe combinarse con un esquema de discretización apropiado para sacarle el máximo partido. En este sentido, se adopta el esquema de alta resolución (*High Resolution Scheme*) para minimizar la difusión del contacto agua-aire, ya que esta estrategia ha probado ser exitosa en muchos otros casos de estudio (Zhao *et al.*, 2008; Andersson *et al.*, 2013, entre otros).

En lo que se refiere al tipo de análisis, se trabaja con simulaciones transitorias de 10 segundos de duración, utilizándose pasos temporales de 0.001 segundos en cada uno de los escenarios considerados. Durante la simulación, variables como el flujo másico de agua y aire que entra y sale del dominio se monitorizan. Se asume que la solución ha convergido cuando estos monitores son estables, el error relativo de las variables (*imbalances*) se mantiene por debajo del 0.1% y la norma del vector residual (RMS *Residuals*, del inglés, *Root Mean Squared Residuals*) permanece por debajo de 10^{-4} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS MISMOS

Para analizar el efecto hidráulico asociado a la colocación de una compuerta inflable sobre un vertedero, es necesario caracterizar el flujo en términos de la evolución de presiones sobre el paramento y de los coeficientes de descarga asociados. Concretamente, estos aspectos se analizarán en base a los resultados del modelo físico y numérico, los cuales serán presentados a continuación. Es importante resaltar que, tal y como se ha mencionado, el modelo físico permite estudiar las condiciones de flujo para el aliviadero en su situación actual y con las compuertas desinflada e inflada (nivel de inflado del 25, 50, 75 y 100%), mientras que en el modelo numérico únicamente se estudiarán los casos de aliviadero desnudo y con compuerta desinflada y totalmente inflada.

Evolución de presiones sobre el paramento

- a) Aliviadero en situación original. Comenzando por los resultados experimentales, la Figura 4 muestra la distribución de presiones para los distintos escenarios de vertido considerados respecto a la altura de diseño del aliviadero ($\Delta H/H_d$). En ella se puede ver que para sobrevertidos superiores a $\Delta H/H_d=0.9$ se registran valores negativos de presión hasta el

punto P11, a partir del cual las presiones se mantienen en todo momento positivas. Con respecto a la magnitud de las depresiones, se debe destacar que éstas alcanzan un máximo de $-2.8 \cdot 10^4$ Pa en el punto P2 (aguas arriba de la cresta del vertedero) para $\Delta H/H_d=1.23$. Estos valores se encuentran razonablemente alejados del inicio de cavitación.

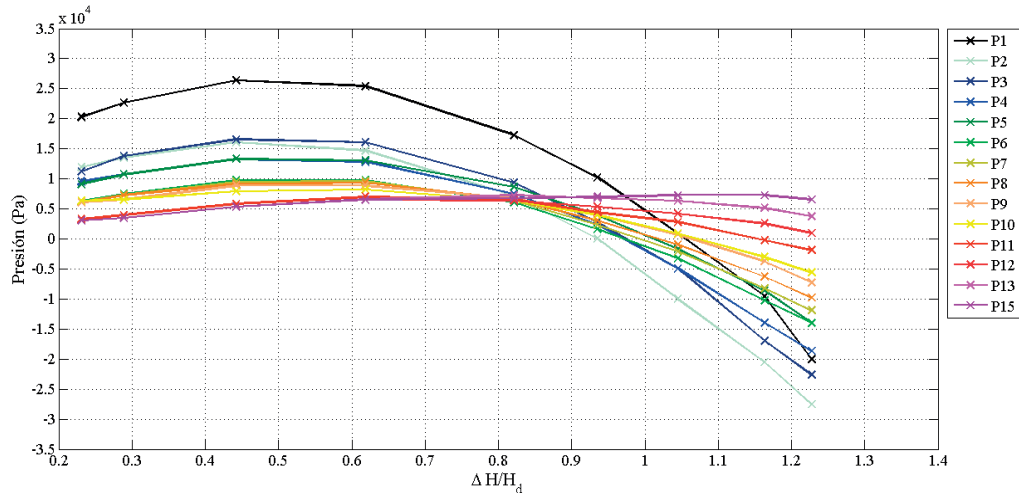


Figura 4 | Evolución de las presiones sobre el paramento en el aliviadero original según el modelo físico.

Los resultados del modelo numérico se muestran en la Figura 5, donde se representa la presión relativa (con respecto a la atmosférica) sobre el paramento para dos sobrevertidos concretos, correspondientes a la altura de diseño ($\Delta H/H_d=1$) y al sobrevertido máximo considerado ($\Delta H/H_d=1.36$). Con respecto a la magnitud de los valores, se puede ver que apenas se registra depresión para el sobrevertido igual a la altura de diseño del vertedero, mientras que ronda los $-5.0 \cdot 10^4$ Pa para el escenario de sobrevertido máximo aguas arriba de la cresta del vertedero. Este comportamiento resulta coherente con los resultados observados en el modelo físico, los cuales se han interpolado, escalado y representado en cada punto de medida para los niveles de sobrevertido considerados con el fin de facilitar la comparación entre ambas aproximaciones.

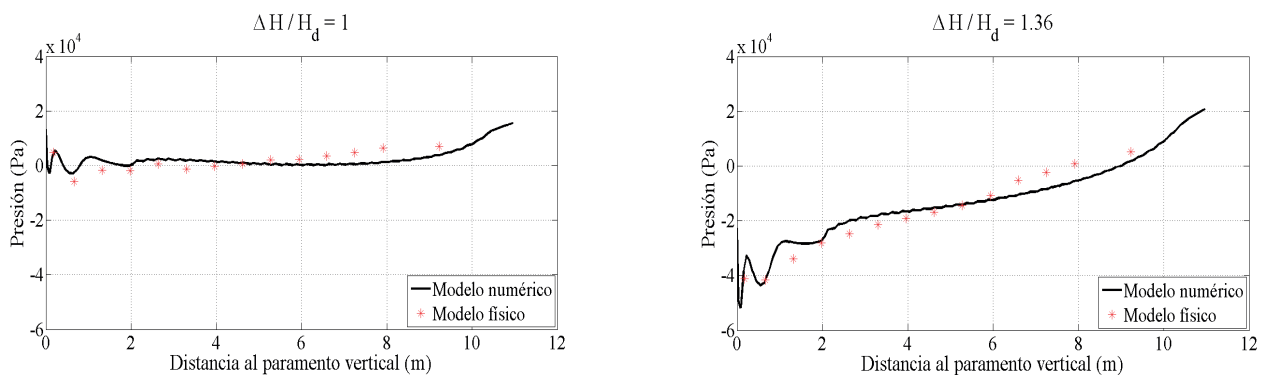


Figura 5 | Evolución de las presiones sobre el paramento en el aliviadero original según el modelo numérico y comparación con el modelo físico: sobrevertidos $\Delta H/H_d=1$ y $\Delta H/H_d=1.36$.

- b) Compuerta desinflada. Las presiones registradas sobre el paramento en el modelo físico una vez colocada la compuerta desinflada se recogen en la Figura 6, donde no se representan las mediciones en los puntos P2 y P3 por quedar demasiado cerca del anclaje, que distorsiona la medida (ver Figura 2). Además, debe mencionarse que se han experimentado complicaciones para la medición de las presiones en aquellos puntos que quedan bajo la compuerta (de P4 a P10),

ya que se forma una bolsa de aire que oscila con el tiempo y hace variar las medidas tomadas, siendo las oscilaciones de incluso el 10% en algunos casos. Este fenómeno se traduce en una agitación de la compuerta a partir de un cierto sobrevertido ($\Delta H/H_d=0.70$ aproximadamente). Concretamente, la alteración comienza con la aparición de bolsas de aire bajo la compuerta en la zona más próxima al anclaje, para luego desplazarse en la dirección aguas abajo y terminar sacudiendo su extremo. Esta sacudida favorece a su vez la entrada de aire bajo la compuerta, desarrollándose el proceso de forma continua, tanto más frecuente y violenta cuanto mayor es el sobrevertido. No obstante, la presencia de esta bolsa de aire es favorable, puesto que facilita la circulación del aire capturado en el contacto compuerta-laterales, actuando como si se tratase de un canal para el reparto de aire bajo el chorro, que fluye por el paramento para disminuir las presiones negativas. Por este motivo, se produce una notable disminución de las depresiones con respecto al caso del aliviadero original, siendo el máximo ahora de aproximadamente $-2.1 \cdot 10^4$ Pa para el máximo sobrevertido considerado. En este sentido, debe destacarse que el máximo se produce ahora en el punto P11, localizado inmediatamente aguas abajo del final de la compuerta desinflada. Esto se debe al lanzamiento del chorro que se produce al final de la misma, el cual genera una cierta succión aguas abajo. No obstante, se debe matizar que existe una distancia prudente para el inicio de la cavitación. Además, en la estructura real la capacidad de aireación será mayor que en el modelo físico debido a la presencia de las pilas entre los vanos, por lo que esta estimación representa el escenario más desfavorable.

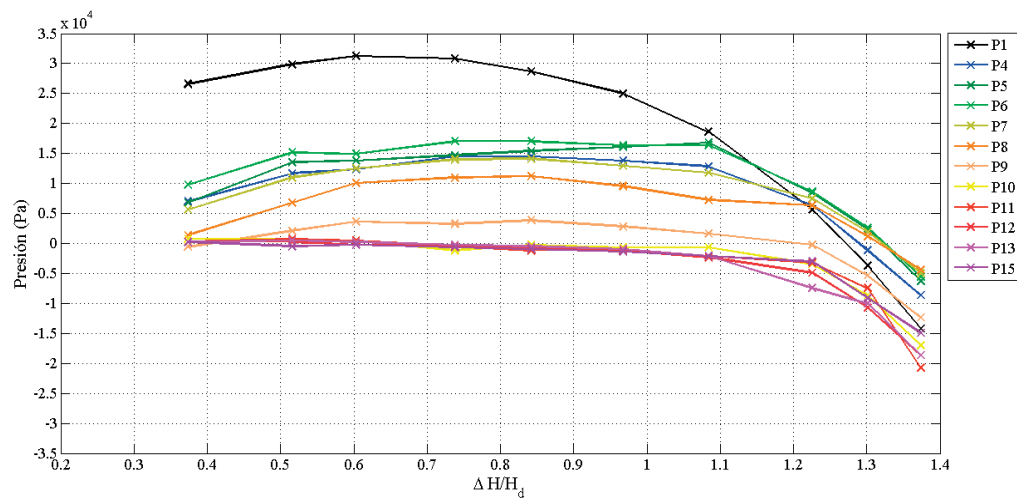


Figura 6 | Evolución de las presiones sobre el paramento tras la colocación de la compuerta desinflada según el modelo físico.

En lo que respecta al modelo numérico, la Figura 7 muestra la evolución de la presión sobre el paramento para un sobrevertido $\Delta H/H_d=1$ y su comparación con los valores correspondientes en el modelo físico, así como un detalle de la distribución de presiones en el entorno del final de la compuerta obtenido con el modelo numérico. En primer lugar, se puede ver que la mínima presión alcanza $-5.0 \cdot 10^4$ Pa en el extremo aguas abajo de la compuerta desinflada, aún sobre la superficie de la compuerta de goma. Por tanto, este valor mínimo no puede compararse con los resultados del modelo físico, que evalúan la distribución de presiones exclusivamente sobre el paramento. No obstante, los valores proporcionados por ambos modelos ponen de manifiesto la importancia de la aireación y de la oscilación inducida a la compuerta para compensar el fuerte gradiente de presiones que se produce en este escenario. Además, cabe destacar que esta aproximación 2D no reproduce la entrada de aire en los laterales, pero sí simula la aireación bajo la compuerta para permitir el lanzamiento del chorro por medio de un *opening*. Este efecto de la aireación bajo el chorro es de suma importancia, ya que si esta apertura de 3 m a presión atmosférica se suprimiera en el modelo CFD, la depresión alcanzaría $-1.2 \cdot 10^5$ Pa en el extremo de la compuerta, produciéndose cavitación, y reflejando con estos valores el fuerte gradiente que produce la circulación del aire bajo el chorro en caso de permitirse su entrada. Por otro lado, se debe mencionar que se produce un máximo local 20 m aguas abajo del paramento vertical debido al impacto del agua contra el paramento de la presa, el cual no se refleja en la Figura 6 por localizarse aguas abajo de los puntos de medida. En este respecto, debe

destacarse que el impacto del chorro contra el paramento podría ocasionar la erosión del hormigón si perdurase en el tiempo, aunque este estudio queda fuera del ámbito del presente trabajo.

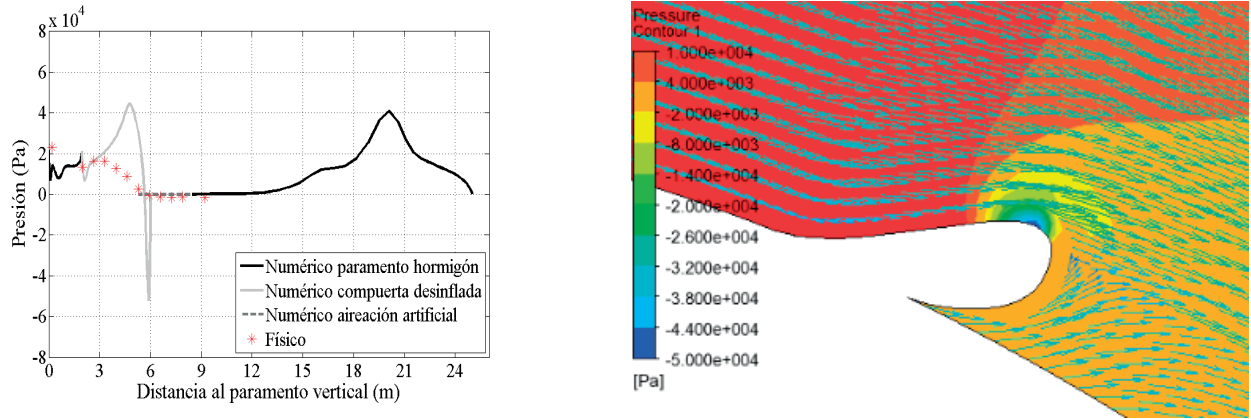


Figura 7 | Evolución de las presiones sobre el paramento tras la colocación de la compuerta desinflada según el modelo numérico, comparación con el modelo físico y detalle de la distribución de presiones en el extremo de la compuerta según el modelo numérico: sobrevertido $\Delta H/H_d=1$.

c) Compuerta inflada. La Figura 8 muestra las presiones medidas en el modelo físico para el escenario de la compuerta totalmente inflada (100%). Cabe destacar que el rango de sobrevertidos evaluado es ahora sensiblemente menor, ya que la regla de operación asumida sólo contempla un sobrevertido máximo de 3 m a escala de prototipo ($\Delta H/H_d=0.07$ si la compuerta se encuentra inflada al 100%, i.e. presenta una altura de 2.5 m), por encima del cual comenzaría a desinflarse. La presión sobre el paramento aumenta con la altura de sobrevertido, manteniéndose las presiones en todo caso positivas. Debe destacarse que hay un máximo local de aproximadamente $2.0 \cdot 10^4$ Pa en P8, punto de impacto del sobrevertido contra el paramento (ver Figura 2). Esto provoca un aumento de la presión que se tiende a desplazar hacia aguas abajo a medida que aumenta el sobrevertido, localizándose en P9 y P10 para vertidos mayores. Sin embargo, las presiones no son excesivas en ninguna posición, no suponiendo ningún riesgo para la integridad del paramento de la presa. Este mismo patrón se mantiene para niveles de inflado del 25, 50 y 75%.

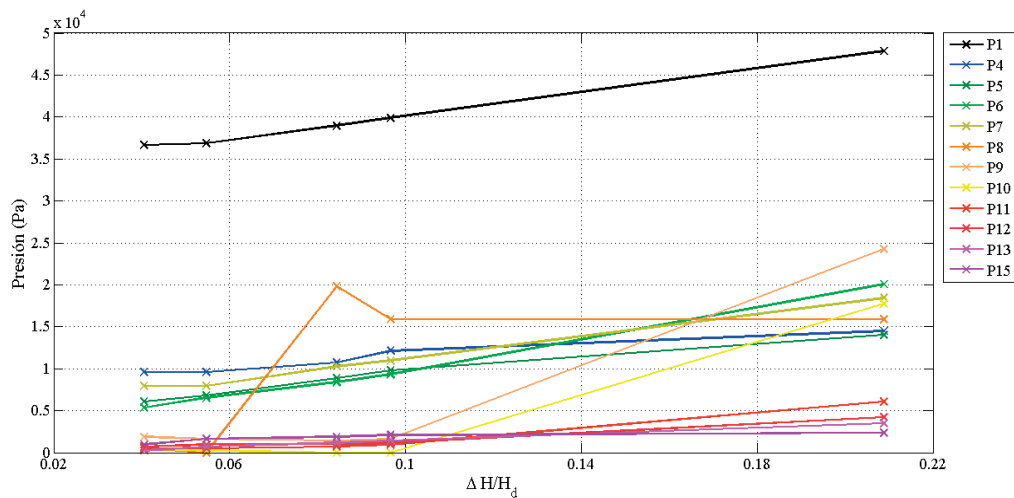


Figura 8 | Evolución de las presiones sobre el paramento tras la colocación de la compuerta totalmente inflada según el modelo físico.

La Figura 9 muestra la distribución de presiones según los resultados numéricos para el escenario de 0.5 m de sobrevertido a escala de prototipo sobre la compuerta totalmente inflada, así como el detalle de la distribución de presiones en el entorno de la compuerta para este caso y los resultados experimentales asociados. Destaca la similitud entre los resultados numéricos y los resultados del modelo físico, manteniéndose las presiones positivas y de magnitud similar. Además, cabe resaltar que el máximo local se produce en la aproximación numérica aguas arriba de P8. Esto se debe a que al no consentir la aireación bajo la compuerta inflada, el chorro se mantiene más adherido a la compuerta, produciéndose su tímido impacto contra el paramento más aguas arriba que en las observaciones experimentales.

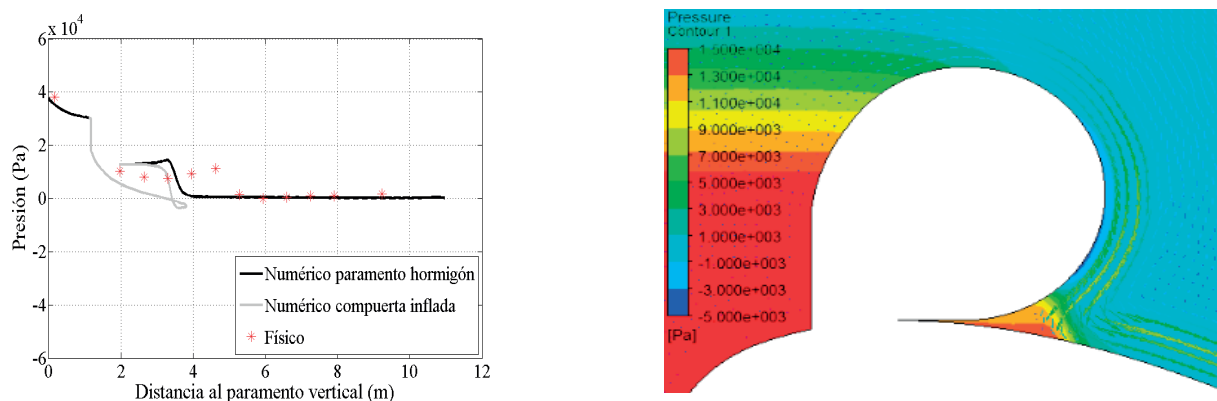


Figura 9 | Evolución de las presiones sobre el paramento tras la colocación de la compuerta totalmente inflada según el modelo numérico, comparación con el modelo físico y detalle de la distribución de presiones en el extremo de la compuerta según el modelo numérico: sobrevertido $\Delta H/H_g=0.07$.

Coefficientes de descarga

- a) Aliviadero en situación original. El coeficiente de descarga se puede determinar en base a las medidas en el modelo físico y los resultados del modelo numérico conforme a la Ecuación (1). La Tabla 1 recoge estos valores, así como los propuestos por Khatsuria (2004) para un perfil de las mismas características. La comparación pone de manifiesto que las diferencias relativas entre las tres propuestas se mantienen en todo caso por debajo del 13%, reduciéndose a medida que el nivel de sobrevertido aumenta puesto que la importancia relativa de los errores es mayor para bajos ΔH . Debe destacarse que el número de Reynolds asociado a $\Delta H=1$ m es relativamente bajo y no representa correctamente el comportamiento del flujo, pero aun así muestra que la tendencia se mantiene incluso para bajos sobrevertidos.

Tabla 1 | Comparación de coeficientes de descarga para el aliviadero original en base al modelo físico, al modelo numérico y Khatsuria (2004)

Nivel de sobrevertido ΔH (m)	Coeficiente de descarga adimensional C_d			Máxima diferencia relativa (%)
	Modelo físico	Modelo numérico	Khatsuria (2004)	
1	0.55	0.60	0.62	12.9
2.5	0.59	0.65	0.66	12.7
4	0.62	0.69	0.70	12.1
6	0.68	0.73	0.72	7.3
7	0.71	0.76	0.75	7.0
8	0.74	0.77	0.76	3.9
9.5	0.79	0.80	0.79	1.3

- b) Compuerta desinflada. Caracterizar el efecto que tiene la presencia de la compuerta desinflada sobre el vertedero es fundamental, ya que uno de los motivos que puede llevar a la colocación de compuertas inflables sobre un vertedero es que la respuesta de la presa en caso de avenida se mantenga inalterada, sin comprometer su seguridad. En este sentido, en el modelo físico se ha analizado por separado el efecto de colocar únicamente los elementos auxiliares (recrecimiento y prismas triangulares laterales) y el efecto adicional que supone la presencia de la compuerta. La Figura 10 muestra las diferencias de estos dos escenarios con respecto al aliviadero original conforme a los resultados observados en el modelo físico. Se puede ver que pese a que la colocación del recrecimiento y los prismas laterales supone una reducción de la longitud de vertido y una obstrucción al flujo, respectivamente, la presencia de la membrana tiene un mayor efecto en la reducción del coeficiente de descarga. El motivo es que debido al reparto de aire bajo la compuerta se produce una reducción de las presiones negativas en el entorno de la cresta. Esto provoca una reducción del gradiente de energía entre ambos lados del aliviadero, reduciendo el valor del flujo evacuado y, por tanto, del coeficiente de descarga. No obstante, la reducción máxima del coeficiente de descarga es del 12 %, que puede considerarse asumible si se tiene en cuenta el importante aumento en términos de almacenamiento que aportan las compuertas en operación ordinaria.

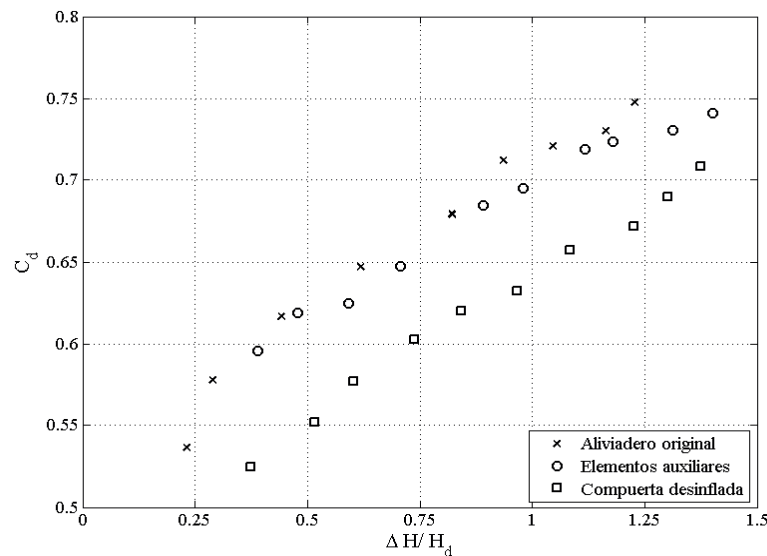


Figura 10 | Efecto de la colocación de la compuerta desinflada en términos de coeficiente de descarga según el modelo físico.

En lo que respecta a la comparación con el modelo numérico, la comparación de los coeficientes de descarga es sólo aproximada, ya que la aproximación numérica 2D no permite reproducir los pliegues y anclajes laterales, la aireación real, etc. En cualquier caso, el coeficiente de descarga para un sobrevertido igual a la altura de diseño ($\Delta H/H_d=1$) resulta en la simulación numérica $C_d=0.71$. Este resultado refleja una desviación inferior al 13% respecto al modelo físico y además supone una disminución de aproximadamente el 7% con respecto al valor correspondiente para el aliviadero desnudo (Tabla 1), coherente con las observaciones experimentales.

- c) Compuerta inflada. En este escenario el coeficiente de descarga se refiere al umbral determinado por la cresta de la compuerta para una cierta presión de inflado H_{op} , por lo que su valor no es comparable con los obtenidos anteriormente. Aun así, resulta interesante estudiar su variación con el nivel de inflado en el modelo físico, ya que su valor puede resultar útil para el cómputo de caudales de descarga en estos escenarios. La Figura 11 muestra la evolución de los coeficientes de descarga para los diferentes niveles de inflado con respecto al nivel de sobrevertido adimensionalizado con el valor de la altura máxima de la compuerta para cada nivel de inflado (H_{max}), siendo éste un ratio frecuentemente analizado para el análisis del coeficiente de descarga en compuertas inflables (Al-Shami, 1983; Alhamati *et al.*, 2005). Esta imagen muestra que si bien es cierto que no parece existir una clara tendencia para los coeficientes de descarga asociados a cada nivel de inflado por separado, se

puede apreciar un aumento gradual del coeficiente de descarga (para alturas de sobrevertido relativas similares) a medida que disminuye la presión de inflado. Esta tendencia se explica porque a medida que disminuye el nivel de inflado, la forma de la compuerta se adapta mejor a las condiciones impuestas por el flujo de agua, suponiendo una menor obstrucción al flujo y, por tanto, aumentando el coeficiente de descarga. También se puede apreciar que al aumentar $\Delta H/H_{max}$, el coeficiente de descarga tiende a estabilizarse, correspondiendo $C_d=0.576$ al régimen crítico.

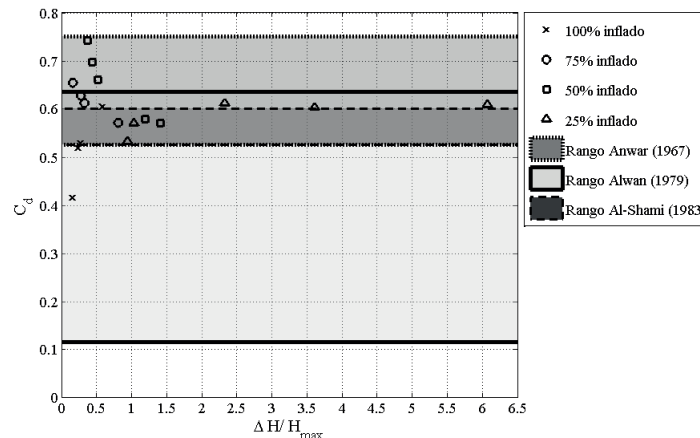


Figura 11 | Efecto del nivel de inflado en el coeficiente de descarga según el modelo físico.

En la Figura 11 también se representan algunos de los rangos habituales para compuertas inflables reguladas por aire, que han sido armonizados sobre una misma expresión general de vertedero con coeficiente adimensional (Ecuación (1)). Concretamente, se representan los rangos definidos por Anwar (1967), de 0.53 a 0.75, los de Alwan (1979), de 0.12 a 0.64 y los de Al-Shami (1983), de 0.53 a 0.60. En este sentido, se debe matizar que no se añaden otros valores propuestos en la literatura debido a su falta de adecuación al caso que aquí se trata. Este es el caso de la expresión empírica propuesta por Alhamati *et al.* (2005), deducida para compuertas inflables con doble anclaje y asociada a coeficientes de descarga sensiblemente superiores. La comparación pone de manifiesto que las recomendaciones de los autores son bastante dispares, pero los resultados obtenidos en el modelo físico coinciden dentro de la zona de solape de varios criterios, viniendo a confirmar una banda más estrecha entre $C_d=0.40-0.75$. No obstante, existen errores asociados a esta estimación experimental, ya que para sobrevertidos bajos existe un mayor error relativo asociado a la medida del nivel de sobrevertido. Además, para estos niveles bajos de sobrevertido no se produce vertido uniforme en toda la anchura de la compuerta, fenómeno que se ve acentuado por la formación de pliegues en los laterales (ver Figura 2), los cuales actúan como fuente de error adicional, de modo más importante cuanto menor sea el sobrevertido. En cualquier caso, las diferencias entre los resultados observados y las propuestas de la literatura pueden deberse a distintas causas: el material de la membrana, el tipo y la forma de anclaje, la superficie de apoyo, la temperatura ambiente, etc.

De nuevo, el resultado de la simulación numérica no resulta totalmente comparable con las observaciones experimentales pero como orden de magnitud, el coeficiente de descarga para un sobrevertido de 0.5 m a escala de prototipo (1.52 cm en el modelo) sobre la compuerta completamente inflada ($\Delta H/H_{max}=0.2$) resulta $C_d=0.70$, algo superior a los valores registrados experimentalmente debido a que numéricamente la compuerta se ha asumido rígida, pero dentro del rango propuesto en cualquier caso.

CONCLUSIONES

La instalación de compuertas inflables sobre vertederos de presa presenta gran potencial, puesto que permite un mejor aprovechamiento del embalse sin alterar drásticamente la respuesta de la presa en caso de avenida. No obstante, es necesario analizar el efecto que la colocación de compuertas inflables puede suponer sobre el comportamiento hidráulico de la presa. Para

ello, en este trabajo se estudia un perfil WES original de paramento vertical aguas arriba y altura de diseño de 7 m, el cual se analiza en su situación original (aliviadero desnudo) y con la compuerta inflable, primero desinflada y luego inflada al 25, 50, 75 y 100%. Para ello, se desarrollan un modelo físico y un modelo numérico CFD, que cubren los mencionados escenarios.

Comenzando por la repercusión en términos de presiones sobre el paramento, hay que destacar que la colocación de la compuerta desinflada supone la aparición de una bolsa de aire entre la membrana y el paramento de la presa, la cual permite contrarrestar las depresiones que se producen para sobrevertidos elevados (por encima de la altura de diseño del vertedero) en el aliviadero. Sin embargo, la entrada de aire en el contacto de la compuerta con las paredes laterales es intermitente, y ocasiona una oscilación en la compuerta para sobrevertidos por encima del 70% de la altura de diseño, que resulta tanto más frecuente e intensa cuanto mayor es el sobrevertido. Así pues, aunque la aireación es favorable y permite reducir las depresiones, induce un movimiento oscilatorio en la compuerta que podría llevar en última instancia a su rotura o la de su anclaje por fatiga. Por su parte, el modelo CFD permite probar que de no existir aireación las depresiones podrían duplicarse. Paralelamente, se analiza el efecto de la compuerta inflada, cuya colocación y sobrevertido no tiene ningún efecto determinante en la presa.

En términos de coeficientes de descarga las aproximaciones numérica y experimental presentan resultados muy similares para el aliviadero desnudo, que validan el planteamiento por ser también muy próximos a los valores encontrados en la literatura para el perfil WES. El análisis de los coeficientes de descarga experimentales pone de manifiesto que se produce una reducción inferior al 12% cuando se coloca la compuerta desinflada, principalmente debida a la disminución de presiones causada por la aireación bajo la membrana. Por su parte, los coeficientes de descarga asociados a la compuerta inflada son variables, pero se ajustan a los rangos habituales y permiten definir una franja de variación para $C_d = 0.40-0.75$, que puede resultar de interés para un primer análisis aproximado. En este respecto, es importante matizar que los resultados proporcionados por el modelo numérico sólo son aproximados en estos escenarios, pues se está considerando una aproximación 2D y una simplificación de la aireación. No obstante, el énfasis de este trabajo no se encuentra en refinar el modelo numérico para que reproduzca fielmente el experimental, sino que se centra en extraer conclusiones sobre los efectos asociados, simplemente comprobando que ambas aproximaciones apuntan en la misma dirección.

Así, se puede concluir que la colocación de una compuerta inflable sobre este vertedero particular no tiene un efecto significativamente negativo en el comportamiento hidráulico del vertedero siempre que la aireación se encuentre convenientemente garantizada, ya que la leve reducción en el coeficiente de descarga se ve compensada por el significativo aumento en el volumen almacenado en el embalse en situación ordinaria. Sin embargo, aunque en este caso particular los resultados sean esperanzadores, se requieren estudios experimentales y numéricos adicionales en otras geometrías y casos de estudio antes de extrapolar resultados, así como analizar los efectos mecánicos que ocasiona sobre la compuerta el movimiento oscilatorio al que puede verse sometida.

AGRADECIMIENTOS

La autora quiere dar las gracias a la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM) por la financiación proporcionada a través de una beca FPI para el periodo 2014-2016.

REFERENCIAS

- Alhamati, A.A.N., Mohammed, T.A., Ghazali, A.H., Norzaie, J., Al-Jumaily, K.K. (2005). Determination of coefficient of discharge for air-inflated dam using physical model. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 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., Lundström, T.S. (2013). CFD-modelling and validation of free surface flow during spilling of reservoir in down-scale model. *Engineering Applications of Computational Fluids*, 7(1): 159-167. doi:10.1080/19942060.2013.11015461

- Anwar, H.O. (1967). Inflatable dams. *Journal of Hydraulic Divison-ASCE*, 93(HY3): 99-119.
- Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997). *Turbulence modelling validation, testing and development*. Ames Research Center, California, USA.
- Bureau of Reclamation. (1987). *Design of Small Dams*. United States Department of the Interior.
- Binnie, G.M., Thomas, A.R., Gwyther, J.R. (1973). Inflatable weir used during construction of Mangla Dam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part I- Design and Construction*, 54(4): 629-639. doi:10.1680/iicep.1973.4184
- Chanson, H. (1997). A review of the overflow of inflatable flexible membrane dams. *Australasian Civil/Structural Engineering Transactions*, CE39(2-3): 107-116.
- Chanson, H. (1998). Hydraulics of rubber dam overflow: a simple design approach. *13th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Melbourne, Australia, 255-258.
- Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A.R., Boroomand, B. (2014). Numerical analysis of rubber dams using fluid-structure interactions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40: 91-98. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.006
- Feurich, R., Olsen, N.B.R. (2012). Finding free surface of supercritical flows – numerical investigation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(2): 307-315. doi:10.1080/19942060.2012.11015423
- Gebhardt, M. (2006). *Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren, Heft 235*. Ed. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Gebhardt, M. (2007). Stand der Schlauchwehrtechnik, Anwendungsbeispiele und Betriebserfahrungen. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*, 91: 47-56.
- Ghavanloo, E., Daneshmand, F. (2010). Analytical analysis of the static interaction of fluid and cylindrical membrane structures. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 29(4): 600-610. doi:10.1016/j.euromechsol.2009.12.006
- Hassler, M., Schweizerhof, K. (2008). On the static interaction of fluid and gas loaded multi-chamber systems in large deformation finite element analysis. *Computational Methods Applied Mechanical Engineering*, 197(19-20): 1725-1749. doi:10.1016/j.cma.2007.08.028
- Karimpour, A., Kaye, N., Khan, A. (2011). CFD study of merging turbulent plane jets. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE* 137(3): 381-385. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000308
- Khatsuria, R.M. (2004). Ogee or overflow spillways. In: *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. CRC Press, NY, USA.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R. (2007). Dam outlet works. In: *Hydraulic structures-Fourth Edition*. Taylor & Francis, NY, USA.
- Shepherd, E.M., McKay, F.A., Hodgens, V.T. (1969). The fabridam extension on Koombooloomba Dam of the Tully Falls hydroelectric-power project. *Journal of the Institution of Engineers (Australia)*, 41: 1-7.
- Soares, C., Noriler, D., Maciel, M., Barros, A., Meier, H. (2013). Verification and validation in CFD for a free-surface gas-liquid flow in channels. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(2): 323-335. doi:10.1590/S0104-66322013000200010
- Watson, L.T., Suherman, S., Plaut, R.H. (1999). Two-dimensional elastic analysis of equilibrium shapes of single-anchor inflatable dams. *International Journal of Solids and Structures*, 36(9): 1383-1398. doi:10.1016/S0020-7683(98)00034-1
- Zhang, X.Q., Tam, P.W.N., Zheng, W. (2002). Construction, operation and maintenance of rubber dams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(3): 409-420. doi:10.1139/l02-016
- Zhao, C.H., Zhu, D.Z., Rajaratnam, N. (2008). Computational and experimental study of surcharged flow at a 90° combining sewer junction. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE* 134(6): 688-700. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:6(688)