

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

MEJORA DE LA SEGURIDAD HIDROLÓGICA MEDIANTE REHABILITACIÓN DEL CUENCO AMORTIGUADOR DE UNA PRESA DE GRAVEDAD USANDO MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Fernando Salazar¹

Pablo Sánchez²

Javier San Mauro³

Carlos Barbero⁴

Javier Conde⁵

María Aromir⁶

RESUMEN: La presa de Sant Ponç entró en funcionamiento en 1954. Es de gravedad de planta recta, con 59,5 m de altura sobre cimientos. Su aliviadero consta de un vertedero recto de tres vanos de 17 m cada uno regulados por compuertas. La estructura de disipación es singular e incluye un tramo de solera no hormigonado que ha sufrido erosiones. Aunque no comprometen la seguridad de la presa, se ha

¹ International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), fsalazar@cimne.upc.edu.

² AIRTIFICIAL, pablo.sanchez@airtificial.com.

³ International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), jsanmauro@cimne.upc.edu

⁴ Agència Catalana de l'Aigua, cbarberol@gencat.cat

⁵ AIRTIFICIAL, javier.conde@airtificial.com.

⁶ AIRTIFICIAL, maria.aromir@airtificial.com.

diseñado una solución para la mejora de su funcionamiento, que se ha basado fundamentalmente en los resultados de modelos numéricos. Los avances en las prestaciones de estas herramientas permiten analizar con detalle el comportamiento hidráulico de las alternativas planteadas en diversas situaciones de vertido, así como el de los desagües intermedios y de fondo.

1. INTRODUCCIÓN

La presa de Sant Ponç está situada en el río Cardener, en la cuenca del Llobregat, y es una presa de gravedad con una altura de 59,5 m y una longitud de coronación de 311 m. Sus órganos de desagüe incluyen dos conductos de fondo, dos de medio fondo y un aliviadero de tres vanos regulado con compuertas. En el diseño original, la estructura de disipación consiste en un cuenco amortiguador con un diseño singular, y por tanto no tipificado según la clasificación del USBR [1]. En concreto, el cuenco tiene un primer tramo de una corta longitud de solera de hormigón que termina en un bordillo continuo dentado aguas abajo del cual la solera no está hormigonada, extendiéndose en esta configuración hasta un cierre final mediante un dique de escollera.

La necesidad de rehabilitación de este cuenco surge por el destacado deterioro producido en la parte no hormigonada de la solera (Figura 1), cuyo proceso erosivo, de carácter remontante, ya afecta seriamente tanto al lecho y al dique de toma interpuesto como a los muros cajeros, que se muestran parcialmente descalzados. Ante la necesidad de elaborar el proyecto de rehabilitación de la estructura terminal del aliviadero en un periodo corto de tiempo, se decidió el uso de modelización numérica tridimensional para la comprobación del funcionamiento de las alternativas planteadas y la definición de la solución adoptada.



Figura 1: Estado actual del cuenco y cauce receptor.

2. METODOLOGÍA

El trabajo se planteó en las siguientes fases:

- Generación de la geometría del modelo numérico a partir de un levantamiento topográfico del estado inicial.
- Modelización numérica de la situación inicial. A partir de los resultados se analizó el comportamiento general y se identificaron los aspectos a mejorar.
- Propuesta de alternativas para la rehabilitación de la estructura terminal, procediendo a su prediseño por métodos clásicos y, posteriormente, a la comprobación de su funcionamiento hidráulico mediante los correspondientes modelos numéricos.

- Análisis de resultados, propuesta e introducción en el modelo de modificaciones para mejora del funcionamiento hidráulico, selección de la solución más adecuada, y comprobación final.

Para cada uno de los modelos numéricos se analizó la variación de la velocidad en la solera del cuenco amortiguador, de tal manera que se pudiera apreciar la disminución de velocidades para distintas configuraciones. También se estudiaron los campos de velocidades y turbulencias inducidas en la superficie del fluido.

2.1 SOFTWARE Y EQUIPO DE CÁLCULO

Desde el punto de vista matemático, el cálculo hidráulico de un aliviadero y su cuenco amortiguador supone la resolución de un problema de dinámica de fluidos no compresibles con superficie libre. Para poder resolver el sistema en geometrías complejas es necesario disponer de un software capaz de resolver el problema de forma eficiente con discretizaciones espaciales de varios millones de nodos de cálculo. La aplicación utilizada para realizar la simulación hidráulica tridimensional del aliviadero y cuenco amortiguador de Sant Ponç ha sido desarrollada por CIMNE, y se basa en su experiencia en desarrollos anteriores de aplicaciones para el cálculo fluido-dinámico mediante esquemas de elementos finitos [2, 3].

El software de cálculo utilizado resuelve problemas de dinámica de fluidos con superficie libre utilizando las ecuaciones completas de Navier-Stokes para flujo incompresible, según una formulación euleriana (malla fija) de elementos finitos de bajo orden (triángulos y tetraedros), y con una integración fraccionada por pasos con estabilización por subescalas ortogonales que permite modelizar la turbulencia sin un modelo específico para tal fin [4]. La posición de la superficie libre se localiza en cada paso de tiempo con el método levelset [5] y una función de extrapolación. El solver descrito fue programado en C++ y Python e integrado como aplicación FreeSurface en el entorno de código abierto Kratos-MultiPhysics [6, 7]. Asimismo, ha sido utilizado con éxito en trabajos previos de modelización de aliviaderos [3, 8, 9] validando así el uso de este código para la modelización de este tipo de estructuras hidráulicas. Por otro lado, para la elaboración de los modelos geométricos, su discretización, visualización y análisis de resultados, se ha utilizado el programa de pre y post procesamiento GiD, desarrollado por el CIMNE.

2.2 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DE CÁLCULO

Para el estudio del aliviadero y del cuenco de la presa de Sant Ponç primero fue necesario generar su geometría tridimensional a partir de la documentación existente. Esta tarea se desarrolló en paralelo a los trabajos topográficos de campo, de tal manera que se creó una geometría inicial simplificada basada en los planos pre-existentes. Una vez se dispuso de la topografía real del vaso del cuenco, se actualizó la geometría del modelo y se refinó el esquema de discretización previo.

Sobre el dominio 3D se buscó la discretización más adecuada para la resolución del problema de elementos finitos con el caudal deseado. Este proceso consiste en definir el tamaño máximo de los elementos de la malla en las diferentes zonas del dominio de forma que se consiga una correcta reproducción numérica del fenómeno físico a modelizar, así como unos requerimientos computacionales ajustados al calendario del proyecto. Para ello, se deben tener en cuenta aspectos como el calado o la velocidad en las diferentes regiones del dominio para adaptar el tamaño de malla adecuado en cada región. En consecuencia, se ensayaron varias distribuciones espaciales del tamaño máximo del elemento de malla del dominio, considerando un caudal de vertido por aliviadero de 230,38 m³/s para cada una de las compuertas, estando

todas ellas completamente abiertas. Esta situación se corresponde con el caudal de avenida de proyecto.

A partir de los test realizados con diferentes distribuciones de malla, se definieron tres zonas de diferente tamaño máximo de elemento (Figura 2). La primera de ellas comprende los contornos de la embocadura, las pilas, los cajeros, el canal de descarga y la zona situada más arriba del cuenco hasta el cierre del umbral intermedio dentado del cuenco, con una asignación de tamaño máximo de elemento de 0,25 m. La segunda zona comprende los volúmenes interiores de los contornos de la primera zona de asignación descrita anteriormente y tiene un tamaño máximo de elemento de 0,55 m.

Por último, tanto los contornos como el volumen interior de la zona del cuenco aguas abajo del umbral intermedio dentado constituyen la tercera zona de asignación con un tamaño máximo de elemento de 0,87 m. Una vez concluyeron los trabajos topográficos de campo en el interior del vaso de la presa fue posible actualizar la geometría (Figura 2). Aplicando estas regiones de asignación y tamaños máximos de elementos de malla, se obtiene una discretización del dominio de cálculo con más de cuatro millones de elementos tetraédricos.

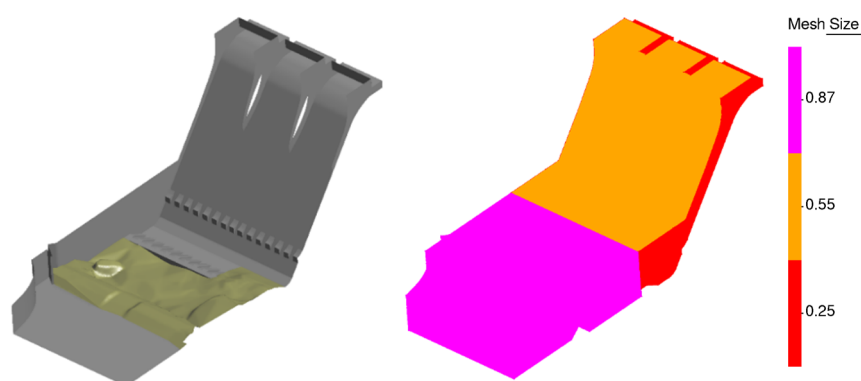


Figura 2: Izquierda: Actualización de la geometría en base a los trabajos topográficos. Derecha: Tamaño máximo de elemento de mado en cada región en que se ha dividido el dominio (medidas en metros).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 SIMULACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ACTUAL

Aplicando la discretización del dominio de cálculo expuesta en el apartado anterior, se ha podido realizar la simulación numérica (Figura 3) del caudal de avenida de proyecto (230,38 m³/s/vano) y estudiar el comportamiento hidráulico de la estructura en su configuración actual. De los resultados obtenidos, cabe destacar el efecto de los dientes situados al final del canal de descarga, que dividen el flujo de alta velocidad de la rápida, haciendo que fluya alternativamente de forma superficial o profunda (Figura 3).

Este efecto, junto con la presencia del umbral intermedio dentado, hace que la mayor parte de la turbulencia superficial se concentre en la parte inicial del cuenco.

Por otra parte, la geometría de la solera no hormigonada aguas arriba del dique de cierre de escollera es marcadamente irregular debido a los procesos erosivos que ha sufrido como consecuencia del funcionamiento del aliviadero. Así, la zona más

cercana al cajero de la derecha tiene una cota sensiblemente inferior a la cercana al cajero izquierdo, donde existe una zona rocosa en la que la erosión ha progresado en menor medida.

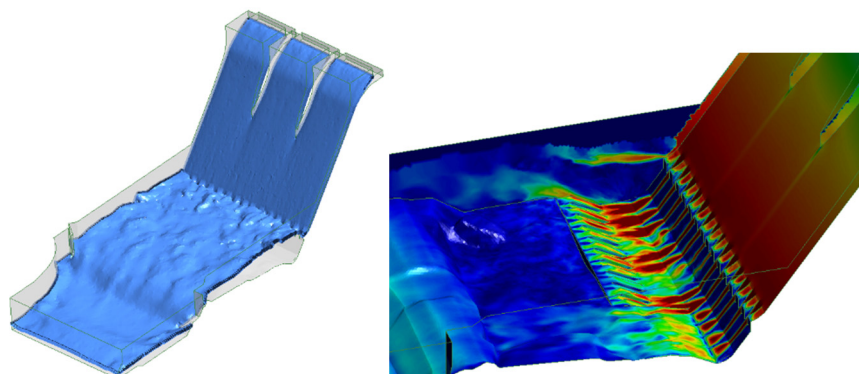


Figura 3: Simulación de configuración actual. Izquierda: posición de superficie libre. Derecha: vista lateral sobre el cajero derecho del campo de velocidades en soleras de aliviadero y cuenco

Esta diferencia de elevación, unida al aterramiento de la zona hormigonada junto al cajero izquierdo, hace que en estas zonas se registren las mayores velocidades de solera (entre 6 y 12 m/s), por lo que podrían tener capacidad erosiva en función de las características de los materiales de esa zona.

Otro efecto observado en el modelo es la velocidad alcanzada aguas abajo del dique de cierre de escollera, de en torno a 10 m/s tanto en la superficie como en el fondo, lo que podría provocar la erosión en esa zona. También se puede observar cómo la aleta oblicua dispuesta al final del cajero derecho para proteger la salida del canal de descarga de la central hidroeléctrica tiene un efecto beneficioso: aleja el flujo de alta velocidad de la salida del canal y crea una zona de sombra de baja velocidad y una reducción local de la lámina aguas abajo de la aleta (Figura 4).

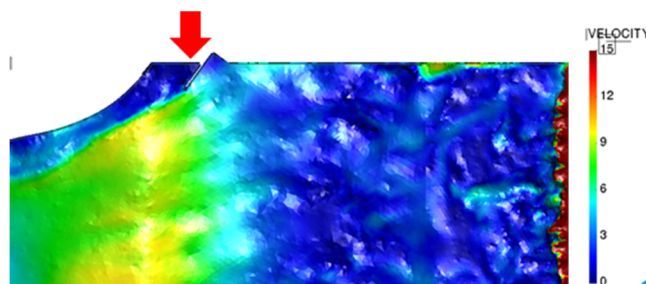


Figura 4: Simulación de configuración actual. Vista en planta del detalle de la modificación del campo de velocidades sobre la superficie libre por la aleta en la salida del canal de descarga de la central.

3.2 ALTERNATIVAS DE REMODELIZACIÓN

A la vista de los resultados obtenidos para la configuración actual del aliviadero y del cuenco, se propusieron varias alternativas de remodelación que fueron simuladas numéricamente. Todas ellas son soluciones más cercanas a los cuencos normalizados habituales [1]. Dentro de esta línea, en las alternativas propuestas se eliminaron los dientes del canal de descarga, así como el umbral intermedio dentado y el dique de cierre de escollera, el cual es sustituido por un bordillo de salida de hormigón. El tramo comprendido entre el pie del canal de descarga y el inicio del bordillo de salida se homogeneiza y hormigona. La Figura 5 ilustra la variación de elementos entre la configuración actual y la base de las alternativas de remodelación propuestas.

A partir de esta base, se propusieron las alternativas de diseño que se describen a continuación. Para todas ellas se realizó una simulación numérica para el caudal de avenida de proyecto y una cota de aguas abajo para ese caudal de 485 msnm según proyecto. La discretización adoptada fue la descrita en apartados anteriores, excepto para las alternativas en las que se introducen dientes de impacto, situaciones en las que se refina el mallado alrededor de los mismos para captar adecuadamente su efecto.

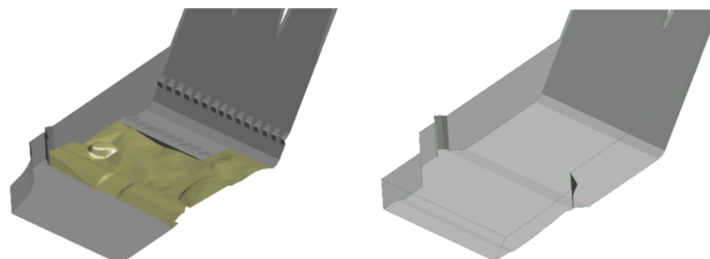


Figura 5: Comparativa entre la situación actual y la alternativa básica de remodelación del aliviadero y el cuenco de la presa de Sant Ponç.

3.2.1 Alternativa 1

La alternativa 1 recorta la aleta que protege el canal de descarga para alinearla con el muro cajero. Esta modificación se propone en vista de la demolición del dique de escollera en el que se apoyaba para la construcción del nuevo bordillo de salida. Los resultados más representativos se muestran en la Figura 6 donde se puede observar cómo la turbulencia superficial se extiende más allá del final del bordillo de salida del cuenco, lo que parece indicar que el resalto no es capaz de disipar toda la energía del vertido en el interior del cuenco y parte de ella escapa fuera del mismo.

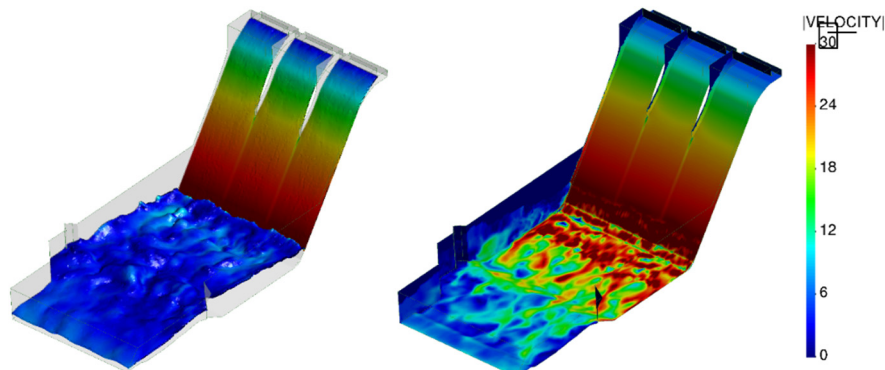


Figura 6: Resultados Alternativa 1. Izquierda: campo de velocidades sobre superficie libre. Derecha: campos de velocidades en soleras de aliviadero y cuenco.

Este fenómeno se observa claramente en la velocidad del agua al final del bordillo de salida del cuenco que muestra valores elevados (12-18 m/s) y podría causar problemas de erosión aguas abajo de la estructura. En definitiva, esta alternativa no parece disipar la energía y contener el resalto en el cuenco de forma adecuada.

3.2.2 Alternativa 2

En esta opción, se añaden dientes de impacto en la unión de la solera del canal de descarga con la solera del cuenco amortiguador de tamaño 1,89x0,49x0,45m. También añade una fila de dientes al final del nuevo umbral de salida en su unión con el lecho del río, en este caso de tamaño 0,8x0,6m. A partir de los resultados obtenidos (Figura 7), cabe destacar que la turbulencia superficial aguas abajo del cuenco amortiguador es claramente inferior a la observada en la alternativa 1. Esto

indica que la disposición de los dientes de impacto en el cuenco ayuda a contener el resalto dentro del mismo y concentra la disipación de la velocidad en su interior. Este hecho se pone de manifiesto en el campo de velocidades en la solera del cuenco y aguas abajo del mismo, con velocidades inferiores a 6 m/s.

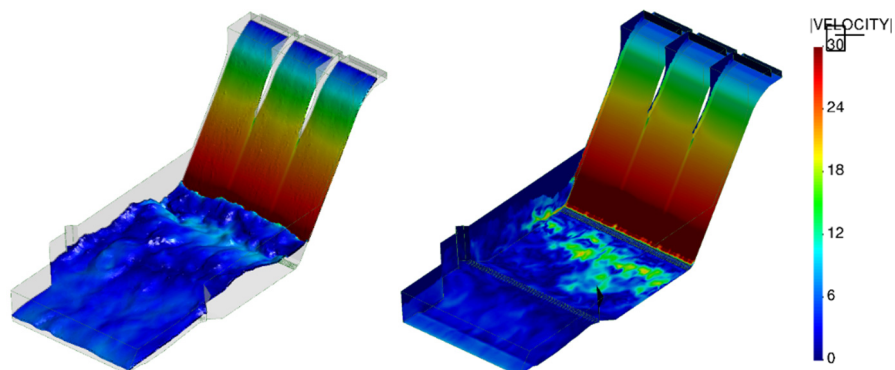


Figura 7: Resultados Alternativa 2. Izquierda: campo de velocidades sobre superficie libre. Derecha: campos de velocidades en soleras de aliviadero y cuenco.

En contraposición, también se han detectado algunos aspectos problemáticos: los dientes de impacto dispuestos en la corona del bordillo de salida del cuenco generan un flujo vertical, que alcanza fácilmente la superficie libre debido a que los dientes están situados en una cota alta y relativamente cerca de la superficie libre. Como resultado, se produce una elevada agitación superficial, que puede ser problemática por producirse en las proximidades de la salida del canal de descarga de la central. Por lo tanto, puede ser deseable reposicionar los dientes de impacto de la salida del cuenco a una cota más baja. Otro aspecto problemático es el efecto del recodo existente en el extremo del muro cajero derecho, que modifica localmente la dirección del flujo, haciendo que éste afecte a la entrada de la central (Figura 8).

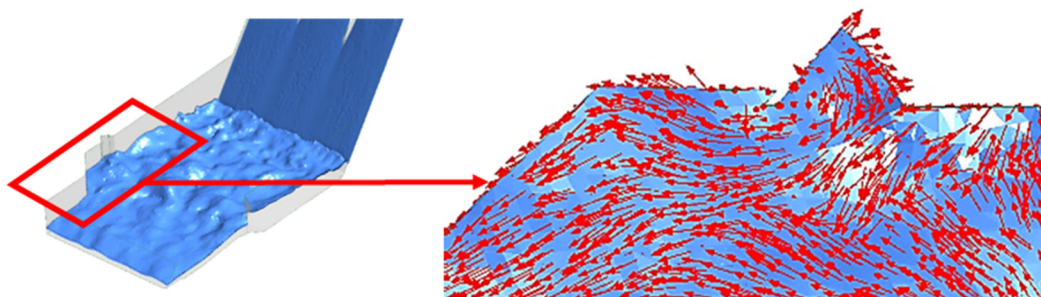


Figura 8: Alternativa 2. Detalle de la salida del canal de descarga de la central. Campo vectorial en la zona del recodo y salida de central aguas abajo, vista en planta.

3.2.3 Alternativa 3

La alternativa 3 mantiene los dientes en la entrada del cuenco, pero se modifican los dientes de salida. En concreto, se aumenta el tamaño de los dientes de salida (1,6x1,2 m) y se trasladan al inicio de la rampa de salida. También se propone continuar el muro del cajero derecho hasta el final del canal de descarga de la central, eliminando el recodo existente en las alternativas anteriores. En general, el rendimiento hidráulico de la estructura es adecuado con la turbulencia superficial contenida en el cuenco (Figura 9). También se observa que los flujos de alta velocidad sobre las soleras se disipan en el interior del cuenco por lo que se reducen las velocidades aguas abajo del bordillo de salida.

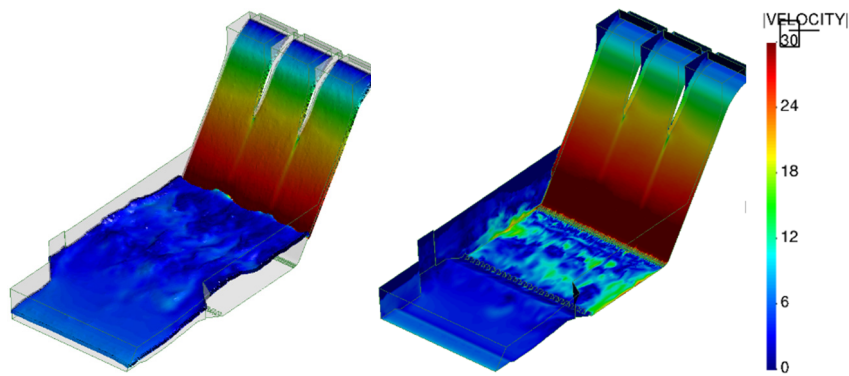


Figura 9: Resultados Alternativa 3. Izquierda: campo de velocidades sobre superficie libre. Derecha: campos de velocidades en soleras de aliviadero y cuenco.

Por otro lado, la reubicación de los dientes de impacto en la zona del pie del bordillo de salida resulta beneficiosa ya que la existencia de un importante calado superior de agua en esa zona permite amortiguar el flujo redirigido verticalmente, reduciendo así los efectos sobre la superficie libre que pueden crear turbulencias. También se verificó que los calados alcanzados sobre los muros cajeros no producen rebalse, obteniéndose que el máximo calado sobre cajeros para el caudal de avenida de proyecto es de 488,8 msnm. También se midió el calado sobre la coronación del bordillo de salida del cuenco, alcanzando una cota de 487 msnm. Otro aspecto a comprobar es el calado alcanzado a la salida del canal de descarga de la central, que corresponde a 486,7 msnm.

Finalmente, se verificó el efecto producido por la prolongación del muro cajero derecho para eliminar el recodo existente en las alternativas anteriores, ya que se evita la reconducción local del flujo que lo dirigía hacia el canal de descarga, siendo esta una modificación que mejora el funcionamiento.

3.3.4 Alternativa 4

La alternativa 4 es similar a la alternativa 3 salvo que mantiene la configuración de la aleta no recortada del diseño original para verificar su efecto positivo en la protección de la salida del canal de descarga (Figura 10). Respecto a los resultados obtenidos (Figura 11), cabe destacar que el comportamiento global del cuenco es similar a la Alternativa 3 en cuanto a la contención de la turbulencia en superficie y la disipación de la velocidad en el interior del cuenco

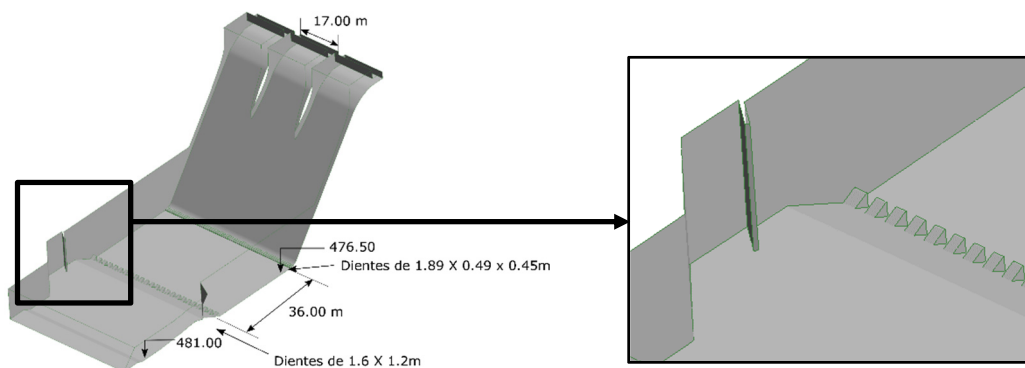


Figura 10: Geometría Alternativa 4. Cuenco regularizado, aleta no recortada sin recodo y dientes de impacto a la entrada y salida de la base del cuenco. Izquierda: vista general. Derecha: detalle de los dientes a salida del cuenco, aleta y prolongación de muro cajero.

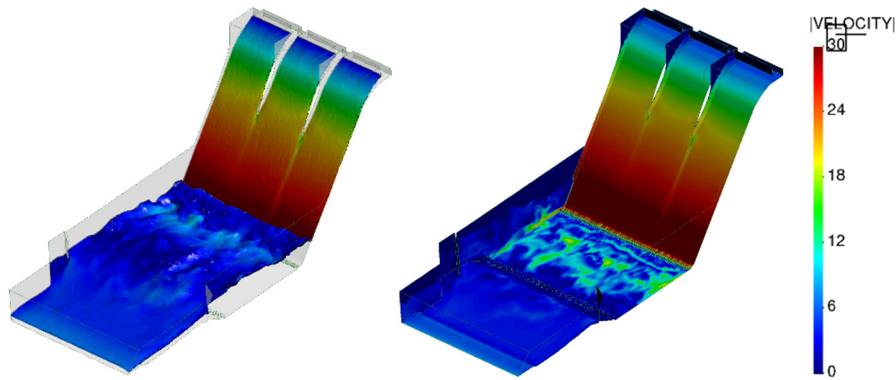


Figura 11: Resultados Alternativa 4. Izquierda: campo de velocidades sobre superficie libre. Derecha: campos de velocidades en soleras de aliviadero y cuenco.

Sin embargo, en las proximidades de la salida del canal de descarga de la central, se aprecian diferencias significativas en los resultados. Se observa cómo la aleta dirige el flujo proveniente del cuenco alejándolo de la salida de la central, creando en sus proximidades una región de baja velocidad y una reducción local de la lámina aguas abajo de la aleta como se ilustra en la Figura 12. También hay que señalar que la variación de la configuración del cuenco en las alternativas propuestas con respecto a la configuración actual no implica una variación significativa de la velocidad de aproximación a la aleta, resultando inferior a 6 m/s.

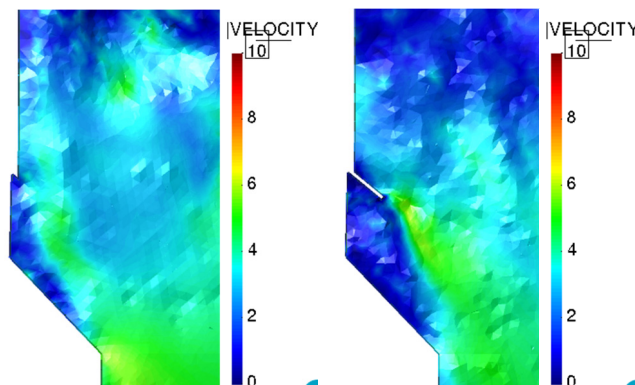


Figura 12: Comparativa del efecto de aleta no recortada en la zona del canal de descarga. Planta del campo de velocidades sobre superficie libre. Izquierda: Alternativa 3. Derecha: Alternativa 4.

En definitiva, todos los efectos mencionados producidos por la aleta no recortada suponen un aumento de la protección de la salida del canal respecto a las configuraciones con aleta recortada. Por tanto, se constata que mantener la aleta en su longitud actual sería beneficioso para la protección de la salida de la central.

4. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que la alternativa 4 ofrece un resultado satisfactorio en cuanto a la disipación de energía en el cuenco amortiguador, la reducción del impacto en la salida de la central hidroeléctrica y los calados en el cuenco. Los resultados más relevantes se resumen a continuación.

- Los calados registrados a lo largo de los cajeros del cuenco, medidos como el promedio a lo largo de 5 segundos de simulación correspondientes a un periodo cuasi estacionario, se sitúan por debajo de la cota de coronación de los cajeros.

- La aleta de protección aleja el flujo principal de la salida de la central, lo que minimiza el efecto de vertido por el aliviadero. El calado medio en esta zona es de 486,2 metros sobre el nivel del mar, con un máximo de 486,6 msnm.

- Los flujos de alta velocidad se limitan a la parte inicial del cuenco, donde se produce la disipación de energía. Las velocidades aguas abajo del bordillo de salida son moderadas.

Aunque no hay duda de la utilidad de la modelización física para la comprobación del funcionamiento de estructuras hidráulicas, los modelos numéricos ofrecen ventajas en casos como el presentado, en el que ha sido posible evaluar con detalle el comportamiento hidráulico de diferentes geometrías en un plazo y con un coste mucho menor de los que habrían sido necesarios para construir y ensayar los correspondientes modelos físicos.

5. REFERENCIAS

1. Peterka A. J. 1964. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering monograph N° 25*. United States Department of Interior. Bureau of Reclamation. Denver, Colorado U.S. Bureau of Reclamation.
2. Larese, A., Rossi, R., Oñate, E. 2015. Finite element modeling of free surface flow in variable porosity media. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 22(4), 637-653.
3. Salazar, F., Morán, R., Rossi, R., Oñate, E. 2013. Analysis of the discharge capacity of radial-gated spillways using CFD and ANN–Oliana Dam case study. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 244-252.
4. Príncipe J, Codina R, Henke F. 2010. The dissipative structure of variational multiscale methods for incompressible flows. *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*.199: 791-801.
5. Osher, S., & Fedkiw, R. P. 2001. Level set methods: an overview and some recent results. *Journal of Computational physics*, 169(2), 463-502.
6. Dadvand, P., Rossi, R., Oñate, E. 2010. An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 17, 253-297.
7. Rossi, R., Larese, A., Dadvand, P. y Oñate, E. 2013. An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 71, 687–716.
8. Salazar, F., San Mauro, J., Oñate, E., & Toledo, M. Á. 2015. CFD analysis of flow pattern in labyrinth weirs. *Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage*, 287-293.
9. San Mauro, J. et al. 2016. Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico. *Ingeniería del agua*, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 127-138. ISSN 1886-4996.