

XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SANTAGO, CHILE, AGOSTO 2014

ESTUDIO DE OPTIMIZACION HIDRÁULICA DEL VERTEDERO GATUN MEDIANTE MODELACION CFD

Sabarots Gerbec, Martín, Badano, Nicolás Diego, Menéndez, Ángel Nicolás

*Laboratorio de Hidráulica – Programa de Hidráulica Computacional, Instituto Nacional del Agua, Argentina
msabger@gmail.com*

RESUMEN:

La verificación y optimización del diseño de vertederos ha sido llevada a cabo históricamente mediante modelación física. Sin embargo, actualmente es posible ejecutar ese tipo de estudios mediante modelación numérica tridimensional, utilizando técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés). La estrategia óptima consiste en emplear simultáneamente ambos tipos de modelaciones, ya que se apoyan mutuamente y se complementan entre sí.

En este trabajo se presenta la aplicación de técnicas numéricas para estudiar el aumento de la capacidad de descarga del Lago Gatún, en el contexto del proyecto de ampliación del Canal de Panamá. Se implementó un modelo numérico CFD del vertedero Gatún actual, el cual indicó que su capacidad de descarga es significativamente menor a la reflejada en la curva de descarga teórica asumida hasta el presente para su operación. Este resultado fue luego verificado mediante mediciones en un modelo físico. El modelo numérico fue utilizado para probar la efectividad de posibles alternativas para incrementar la capacidad de evacuación del vertedero.

ABSTRACT:

The verification and optimization of spillway design have been historically performed through physical modeling. However, it is now possible to undertake these studies through tridimensional numerical modeling, using Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques. The optimum strategy consists in using simultaneously both type of models, as they support and complement each other.

In this paper an application of numerical techniques to study the increase in the discharge capacity of Gatun Lake, in the context of the Panama Canal expansion project, is presented. A numerical CFD model for the current Gatun spillway was implemented, which indicated that its discharge capacity is significantly lower than the one reflected in the theoretical discharge curve assumed so far for the spillway operation. This result was later verified through measurements in a physical model. The numerical model was used to assess the effectiveness of possible alternatives to increase the discharge capacity of the spillway. Numerical modeling was also used to evaluate alternatives for an additional spillway which was going to be built parallel to the existing one.

PALABRAS CLAVES: *Modelación numérica, vertederos, capacidad de descarga, estudio de alternativas*

INTRODUCCIÓN

El Vertedero Gatún es la principal estructura hidráulica de alivio desde el Lago Gatún hacia el Río Chagres. Su propósito es controlar el nivel del lago permitiendo su uso para la navegación y provisión de agua, así como la protección de la Presa Gatún y las Esclusas del Canal de Panamá. El vertedero se terminó de construir y fue puesto en servicio en octubre de 1913.

Cuando el vertedero fue diseñado, la información hidrológica e hidráulica del Río Chagres era muy escasa. Además del cambio de la demanda de agua a lo largo del tiempo, en los años posteriores a 1945 se encontraron deficiencias en la capacidad de erogación del vertedero.

De esta manera, bajo los estándares actuales recomendados para el manejo de inundaciones, la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) determinó que es necesario contemplar un incremento en la capacidad de descarga de la obra de alivio. El estudio de la capacidad de descarga del vertedero fue encomendado a MWH Argentina, que encargó la modelación numérica del vertedero actual al Programa de Hidráulica Computacional del Instituto Nacional del Agua (INA).

DESARROLLO

Metodología

Para resolver numéricamente el problema se parte de las ecuaciones de Navier-Stokes, que constituyen el modelo teórico aceptado como representativo de la dinámica de los fluidos newtonianos, como el agua. Se trabaja, entonces, dentro del marco de lo que se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Se utiliza el código OpenFOAM (Weller et al., 1998), que emplea el método de los volúmenes finitos para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales asociados a cualquier malla tridimensional no-estructurada de celdas poliédricas. La resolución de las ecuaciones de fluidos se llevan a cabo por medio de métodos robustos, implícitos, del tipo presión-velocidad, incluyendo iteraciones para resolver los términos no lineales. Se utiliza paralelización en memoria distribuida mediante la técnica de descomposición de dominio, lo cual es fundamental para disminuir los tiempos de simulación. Para representar a la superficie libre se utiliza una variante de la técnica Volume of Fluid clásica (Hirt y Nicholls, 1981), que resuelve una ecuación advectiva cuya variable independiente es la fracción líquida en cada celda.

Validación – caso teórico/empírico

Con el fin de tener mayor confiabilidad sobre los resultados obtenidos de las simulaciones, se tomó un caso bien documentado, un perfil de vertedero tipo Ogee. El perfil aguas arriba de la cresta está definido por tres arcos de círculo, mientras que aguas abajo sigue la ecuación $x^{1.85} = 2H_d^{0.85}y$, donde x e y son las coordenadas horizontales y verticales respectivamente, H_d es la carga de diseño sobre la cresta. Este perfil empalma con un tramo recto y termina en un trampolín.

Savage y Johnson (2001) publicaron un estudio detallado de la capacidad de descarga para un perfil Ogee con un tirante de diseño de 301mm y un comportamiento totalmente bidimensional. En ese trabajo se compara la capacidad de descarga de acuerdo al manual de la USACE, del USBR con los obtenidos por estos autores mediante modelación física y numérica.

Se implementó un modelo numérico para este caso usando OpenFOAM con el fin de comparar los resultados con los obtenidos por Savage y Johnson. Para esto se construyó una malla de elementos prismáticos adaptados a la geometría, con un tamaño característico de 12 mm, con un refinamiento cerca de los contornos sólidos a fin de poder utilizar funciones de pared.

El caudal fue impuesto aguas arriba distribuido uniformemente en la sección. En la Figura 1 se presentan los resultados de la corrida correspondiente a $Q/Q_d = 1.331$, donde se ve la superficie libre simulada por sobre la cresta y el campo de velocidades para la misma porción del dominio.

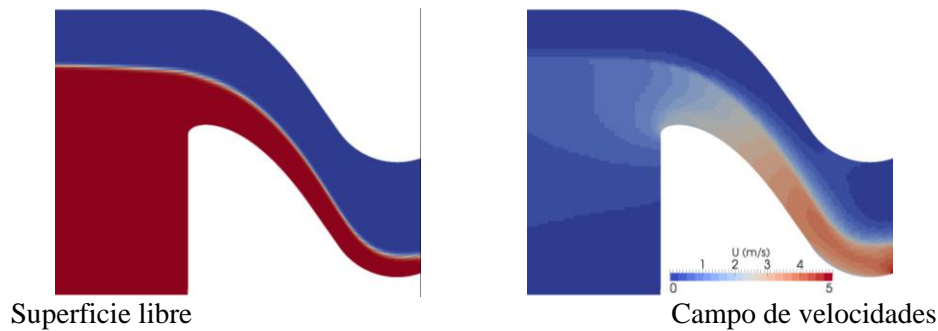


Figura 1.- Resultados numéricos para $Q/Q_d = 1.331$

La altura de carga H_e fue calculada 2m aguas arriba de la cresta del vertedero. Los resultados de la curva de descarga simulados numéricamente se presentan en la Figura 2 junto con los datos presentados por Savage y Johnson, que incluyen valores medidos en modelo físico, valores simulados mediante un modelo numérico comercial (Flow3D) y las formulaciones empíricas del USACE y USBR. El acuerdo entre las distintas curvas de descarga resulta satisfactorio. Cabe destacarse que los valores de modelos físicos y numéricos presentan un mejor acuerdo entre sí que al compararlos con las formulaciones empíricas. Entre los ajustes empíricos, los caudales del USBR resultan excesivamente conservadores.

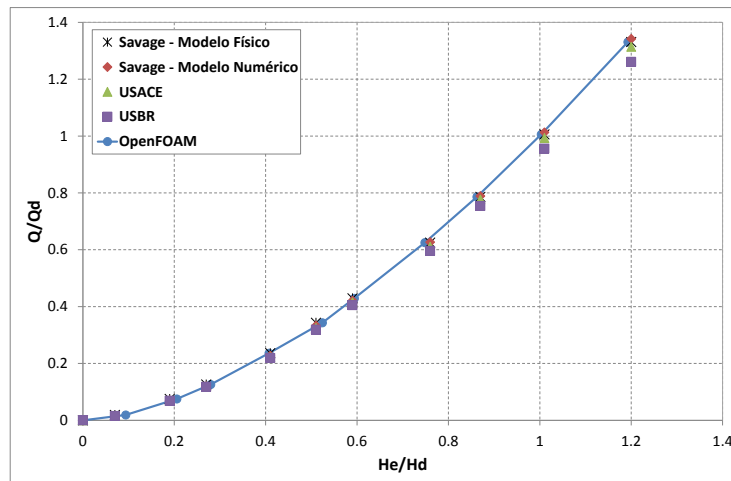


Figura 2.- Curva de descarga del vertedero Ogee

Para determinar los efectos de escala del problema, que pueden aparecer al llevar los resultados del modelo físico al prototipo, se modelaron numéricamente ambas escalas. Se consideró una eventual escala entre prototipo 50 veces mayor al modelo físico. Los resultados representados en una misma escala de modelo resultaron virtualmente idénticos. Esto índice que no son esperables efectos de escala significativos en la curva de descarga para estas escalas de modelo físico.

Para utilizar funciones de pared logarítmicas rigurosamente es necesario que la distancia adimensional del primer nodo a la pared no sea superior a $y_+ \approx 300$. Dado que es en general difícil cumplir este requisito en todos los contornos, sobre todo a escala de prototipo, se estudió el efecto de tener un y_+ muy superior, del orden de 30,000. Los resultados en términos de curva de descarga, presiones y perfil de la lámina fluida resultaron insensibles a este cambio, por lo que se concluyó que el tamaño de malla cercano a la pared no resulta significativo a los efectos del trabajo. Se realizaron pruebas de sensibilidad a la malla de cálculo sin obtener tampoco diferencias significativas.

Aplicación al Vertedero Gatún

El dominio en planta del modelo del vertedero Gatún se presenta en la Figura 3. Cuenta con un tramo de aproximación de 73m, una planta del vertedero semicircular de 14 vanos, con un radio de 102 m y un canal de descarga de 25m del canal. En el cuenco dissipador se encuentran dispuestas

2 hileras de bloques de disipación, la primera de 9 bloques más grandes y la segunda de 10 bloques más pequeños. En ambas hileras hay un bloque faltante cerca de la margen derecha. La cresta del vertedero tiene una cota de 21.03 mPLD, mientras que la cota del cuenco de disipación es de 3.05 mPLD. En la Figura 4 se presenta una vista tridimensional del vertedero, donde se aprecia el perfil de la cresta y la disposición de pilas y bloques.

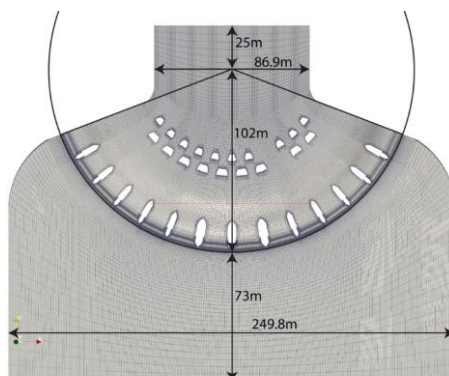


Figura 3.- Dominio del modelo 3D

La generación de una adecuada malla de cálculo es un requisito fundamental para la obtención de resultados precisos. Se ha implementado el siguiente procedimiento:

- Se generó en primer lugar una estructura de bloques hexaédricos (de 8 vértices pero con aristas arbitrarias) conectados entre sí. En este paso se especifican la discretización y las condiciones de borde. Estos bloques acompañan en vertical el perfil del vertedero y en horizontal los muros guías.
- Para representar las pilas, bloques y el terreno en la aproximación se utilizó el mallador *snappyHexMesh* de OpenFOAM. Esta aplicación toma la malla base hexaédrica, subdivide los elementos cercanos a los contornos sólidos y elimina los elementos que no pertenecen al dominio hidráulico, introduciendo las condiciones de borde correspondientes

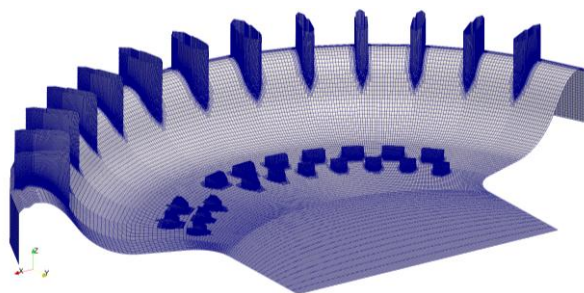


Figura 4.- Vista 3D de la malla del vertedero Gatún

El estudio del vertedero se enfocó en la influencia de la batimetría de aproximación y la nariz de pilas en la curva de descarga y la distribución de caudales por vano. Además, cuantificaron las presiones sobre la cresta del vertedero y cuenco de disipación

Para el primer punto se evaluaron alternativas para determinar si era posible o no una optimización en la curva de descarga.

Las simulaciones preliminares se comenzaron a correr de manera impermanente partiendo de un nivel de embalse constante y con el vertedero seco. Luego, partiendo de esa condición inicial, los distintos escenarios de la curva de descarga y de alternativas se corrieron mediante un código iterativo que converge al estado de flujo permanente, y que resulta computacionalmente más eficiente.

Las simulaciones se realizaron bajo la hipótesis de apertura total de las compuertas. Para obtener varios puntos de la curva de descarga se varió el caudal de entrada y se corrió el modelo hasta alcanzar convergencia de los niveles en la aproximación.

Curva de descarga

Durante y luego de la construcción el vertedero Gatún se realizaron modificaciones constructivas que alteraron el comportamiento hidráulico de la obra respecto del proyectado. Luego, durante la Segunda Guerra Mundial, se dispuso la construcción de una presa sumergida que sirviera de protección al actual vertedero en caso de ataques con torpedos. Esta presa se denomina SIP9 y se ubica inmediatamente aguas arriba del umbral. Al mismo efecto se construyó un muro longitudinal en el centro canal del canal de aproximación para sostener una red que se extiende entre la superficie libre y la cresta de la SIP9. Tanto la SIP9 como el muro se observan en la Figura 5. Estas estructuras alteraron más aún la capacidad de descarga.

El primer objetivo de la modelación numérica consistió, por lo tanto, en diagnosticar la capacidad de descarga actual del vertedero Gatún.

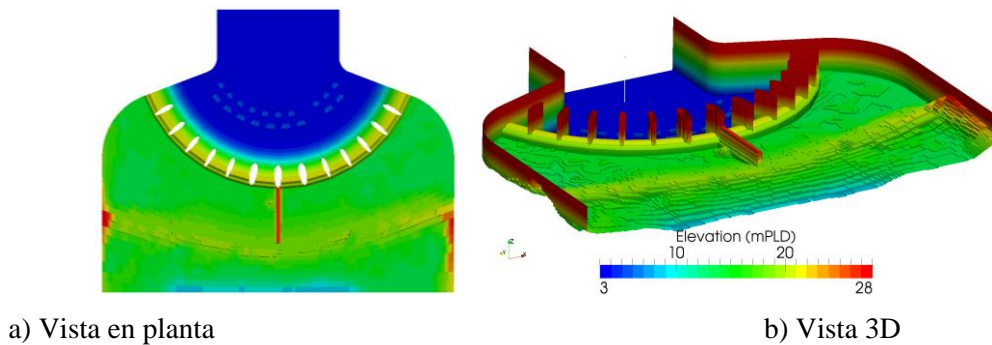


Figura 5.- Canal de aproximación al vertedero

Para cada caudal, el nivel asociado fue obtenido a partir de integrar numéricamente la energía mecánica en una sección en el canal de aproximación. Se verificó que la sección de integración estuviera lo suficientemente alejada del vertedero como para capturar la pérdida de carga debida a la sobreelevación batimétrica (SIP9).

En la Figura 6 se presentan los resultados de la modelación numérica comparados con la curva de descarga que disponía la ACP. Además, se presentan también los resultados del modelo físico abordado a posteriori en el INA. Se observa que efectivamente la capacidad actual del vertedero Gatún es sustancialmente menor a la originalmente proyectada. Por otro lado, los resultados del modelo numérico coinciden muy bien con los del modelo físico.

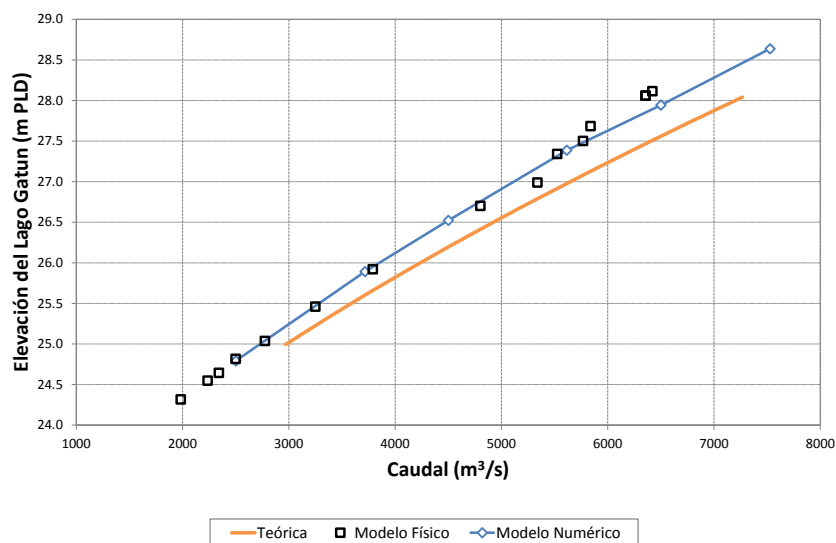


Figura 6.- Comparación de la curva de descarga simulada, medida en modelo físico y provisto por la ACP

En la Figura 7 se ilustra la caída de la línea de energía debida a las pérdidas inducidas por la SIP9, para el caso de un caudal de descarga de $5615 \text{ m}^3/\text{s}$. La caída de energía entre la condición de borde, donde (sección de integración) y la zona cercana a la cresta del vertedero es de 0,2m.

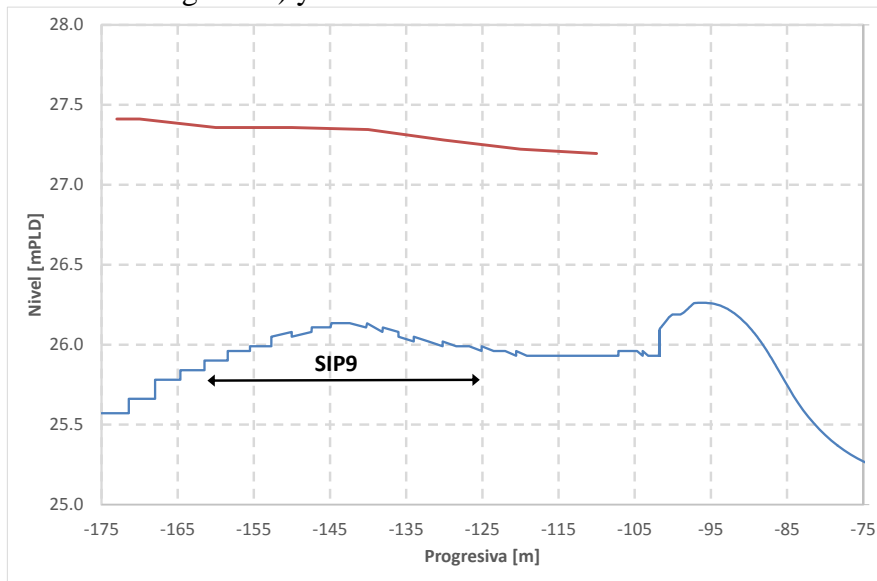


Figura 7.- Caída en la línea de energía debida a la SIP9.

Para una mayor comprensión de la disminución de la capacidad de descarga post-SIP9 se analizó la distribución de caudales por vano. En la Figura 8 se presenta el porcentaje de caudal por vano referido al caudal total dividido por la cantidad de vanos (14) para un caudal de $5615 \text{ m}^3/\text{s}$.

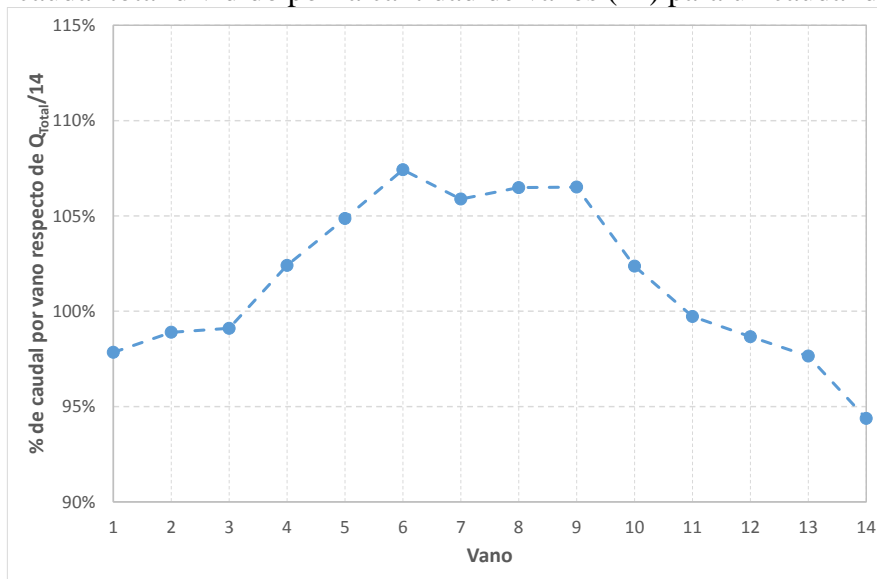


Figura 8.- Distribución de caudales por vano

Se observa una menor capacidad de descarga de los vanos externos, lo cual se debe a la inclinación de los mismos respecto del escurrimiento. Esto último se ve en la orientación de las líneas de corriente que se presentan en la Figura 9. Además, se observan zonas de recirculación que acentúan aún más la disminución en la capacidad de erogación de los vanos externos.

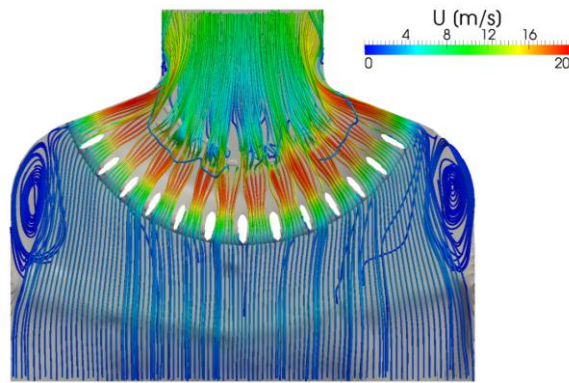
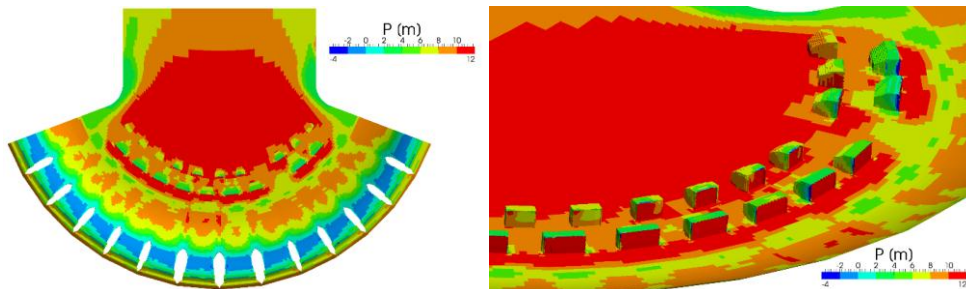


Figura 9.- Líneas de corriente

Distribución de presión

Mediante la modelación 3D es posible obtener el campo de presiones medias, lo cual permite no solo detectar presiones máximas, sino también identificar zonas especialmente vulnerables a la cavitación. Fueron analizadas las presiones para tres caudales diferentes: $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$, and $7,000 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figura 10 muestra una planta del vertedero donde se aprecian presiones medias negativas aguas abajo de la cresta del vertedero y de los dados de disipación. Se observa como las presiones medias negativas se manifiestan en los laterales de los dados inmediatamente aguas debajo de la cara frontal, registrando valores siempre superiores a -2m .

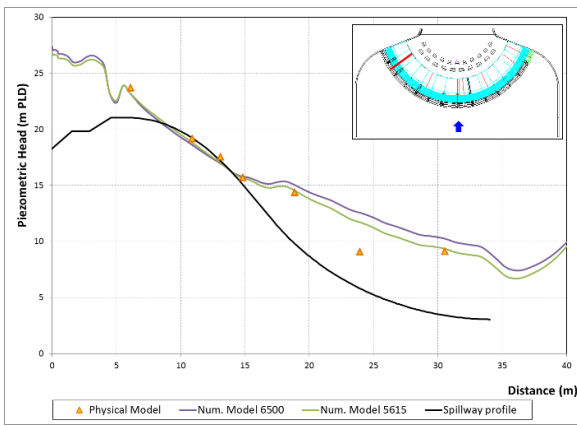


a) Solera/piso del vertedero

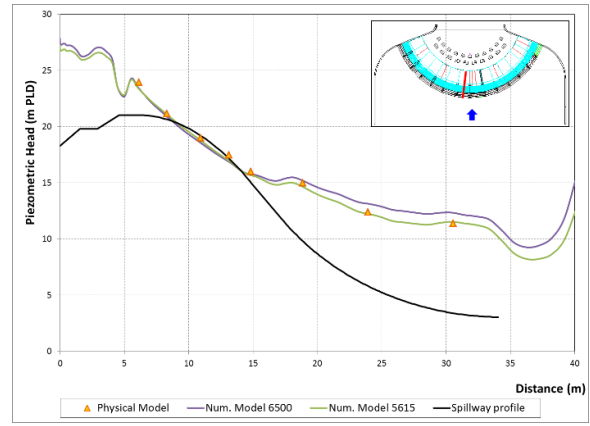
b) Dados de disipación

Figura 10.- Distribución de presiones en el vertedero para $7,000 \text{ m}^3/\text{s}$

Como verificación de los resultados de presiones obtenidos, se compararon perfiles de presiones obtenidos sobre la cresta del vertedero, para distintos vanos con los obtenidos en la modelación física llevada a cabo en el INA. Los resultados del modelo físico que se muestran en la Figura 11 corresponden a un caudal de descarga de $6,070 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que los de las simulaciones numéricas son presentados para dos caudales: $5,615 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6,500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa un muy buen acuerdo entre el modelo físico y el matemático. Cabe destacarse que la correcta representación de las presiones en la cresta es fundamental para simular correctamente la capacidad de descarga.



a) Eje del vano 5 –



b) Eje del vano 7

Figura 11.- Comparación entre presiones medidas y calculadas

Alternativas de optimización

En pos de mejorar la performance del vertedero, se evaluaron algunas alternativas, de reducida intervención sobre la obra. En primer lugar se propuso la remoción completa de la SIP9 (Figura 12). En primera instancia se consideró el fondo del canal de aproximación plano, a cota 3.05 mPLD. En una simulación para un caudal de descarga de 5,615 m³/s, se obtuvo una reducción en el nivel del lago de 0,26m, lo que implica un incremento de la capacidad del 5.8%. En la Figura 14 se puede ver que con esta modificación los resultados resultan más compatibles con lo previstos por la ACP (diseño original).

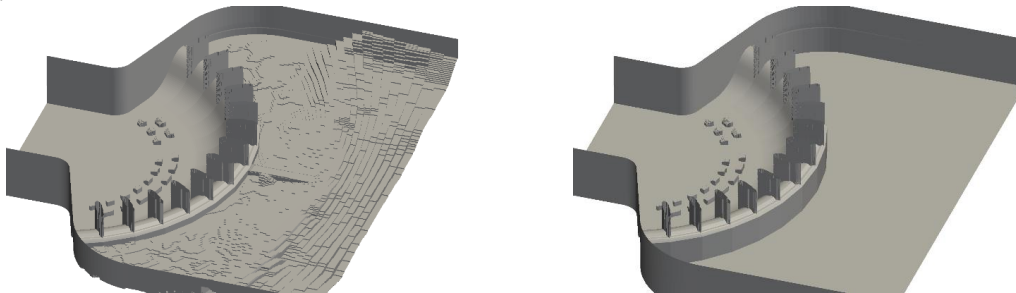


Figura 12.- Configuración actual, con SIP9 (izq.). Alternativa de remoción total de la SIP9 (der.)

En una segunda alternativa, la estructura SIP9 es reemplazada una un talud de pendiente 1V:2H, con bermas laterales (Figura 13). Los resultados mostraron un descenso del nivel del embalse de 0,18m para el mismo caudal, lo que significa una aumento de la capacidad de erogación del 4% (Figura 14).

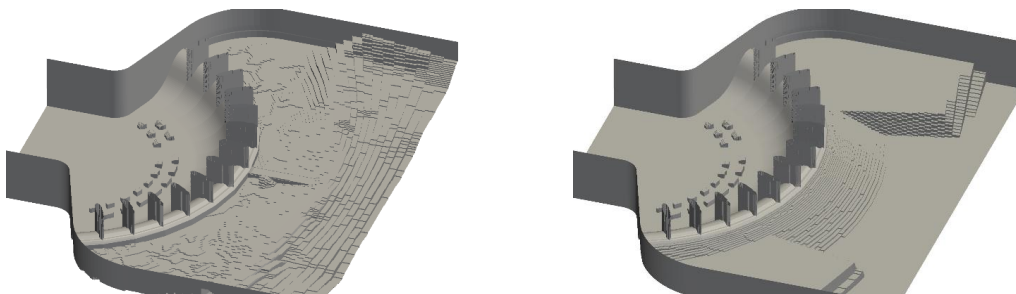


Figura 13.- Configuración actual, con SIP9 (izq.). Alternativa de remoción parcial de la SIP9 (der.)

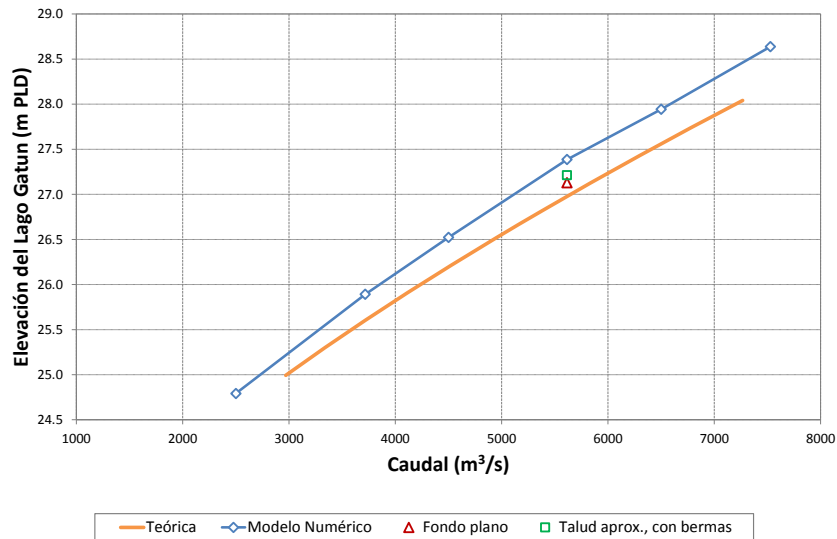


Figura 14.- Curva de descarga incluyendo resultados de alternativas para $Q=5615 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 15 se presenta la distribución de caudales en cada vano para los tres casos. Se observa que al remover o reducir la SIP9 la distribución de caudales se hace más pareja, aumentando en términos relativos el caudal de los vanos extremos.

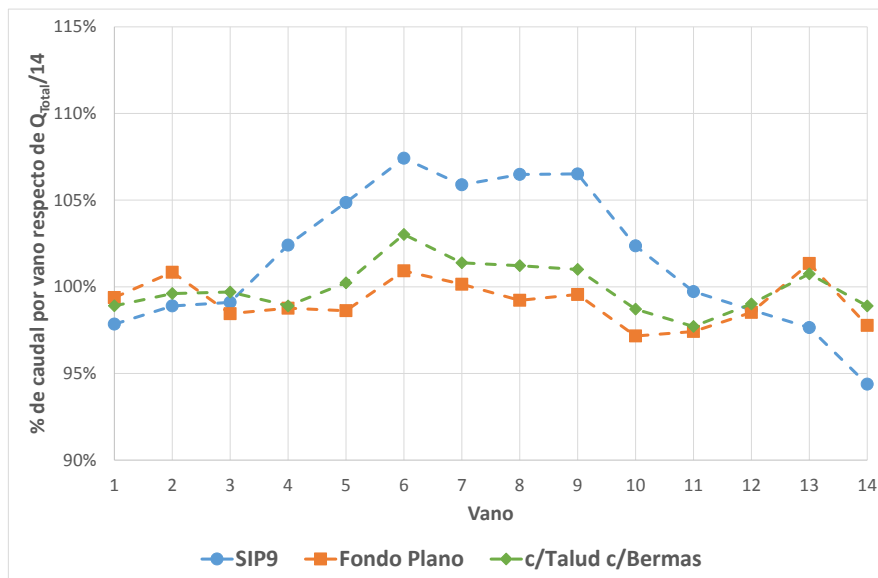
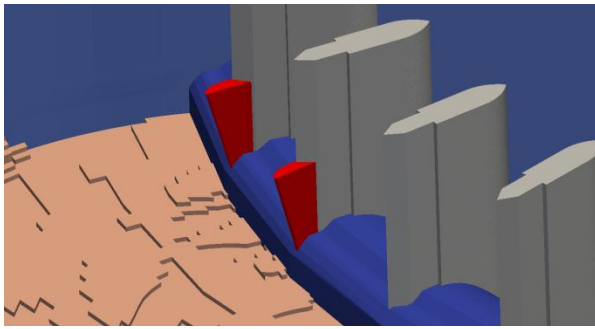
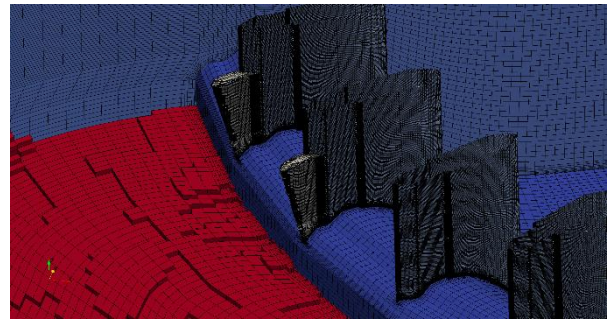


Figura 15.- Distribución de caudales por vano ($5,615 \text{ m}^3/\text{s}$) para las distintas alternativas

De los resultados anteriores se desprende que la menor eficiencia en el funcionamiento del vertedero está asociada a la capacidad de descarga de los vanos externos. Por este motivo se estudió una tercera alternativa enfocada en la modificación de la nariz de las pilas externas, agregándole un suplemento curvo destinado a guiar mejor el flujo hacia esos vanos. La Figura 16 muestra la configuración geométrica y malla utilizada.



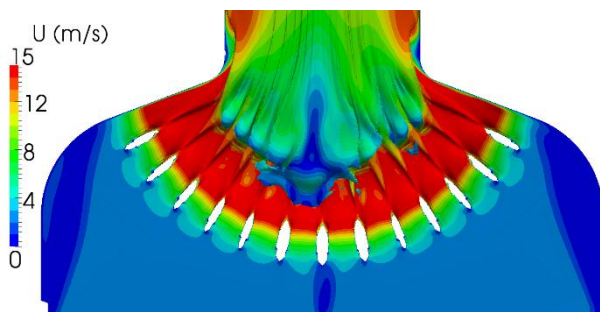
Adiciones propuestas a las pilas extremas



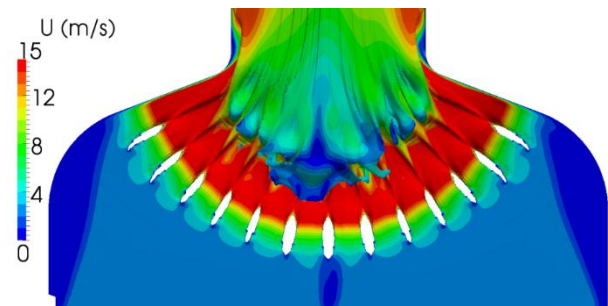
Malla de cálculo en detalle

Figura 16.- Detalle de modificación en pilas extremas

En la Figura 17 se muestran los resultados del campo de velocidades. Se observa que los cambios en la nariz de las pilas no son suficientes para modificar significativamente el patrón de escurrimiento. Como consecuencia no se observó un aumento significativo de la capacidad de descarga.



a) Corrida con las pilas actuales



b) Corrida con las pilas extremas modificadas

Figura 17.- Campo de velocidades en planta - pilas modificadas, caudal de 5615 m³/s

CONCLUSION

Se implementó un modelo numérico CFD con el fin de estudiar el comportamiento hidráulico del vertedero Gatún. Los resultados, tanto de validación como explotación, son consistentes con observaciones efectuadas a posteriori en modelo físico. La utilización conjunta de ambos modelos permitió ganar certidumbre sobre los resultados y reducir el tiempo de estudio.

La capacidad de descarga del vertedero resultó bastante más baja que la prevista, si bien esto era esperable dadas las modificaciones que el proyecto sufrió durante su construcción y vida útil.

Se evaluaron alternativas de optimización hidráulica, las cuales incrementan la capacidad de descarga de la estructura, pero no lo suficiente como para justificar económicamente su implementación. El modelo numérico fue muy útil para hacer una evaluación rápida de las alternativas cuya implementación en modelo físico hubieran sido muy largas y costosas.

REFERENCIAS

- Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C.** (1998) *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object orientated techniques*. Computers and Physics, 12, 620:631.
- Hirt, C.W., Nicholls, B.D.** (1981) *Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries*. Journal of Computational Physics, 39, 201:225.
- Savage, B.M., Johnson, M.C.** (2001) *Flow over Ogee spillway: physical and numerical model case study*. Journal of Hydraulic Engineering, 127-8, 640:649.