Asociación Argentina



de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XLI, pp. 1305-1315 C.I. Pairetti, M.A. Pucheta, M.A. Storti, C.M. Venier (Eds.) L. Domínguez, P. Santoro, M. Ragessi (Issue eds.) Rosario, November 5-8, 2024

MODELO BIDIMENSIONAL DEL RESALTO HIDRÁULICO EN EL CUENCO AGUAS ABAJO DE UN VERTEDERO TIPO CREAGER.

BIDIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF THE HIDRAULIC JUMP DOWNSTREAM OF A CREAGER SPILLWAY

Ana J. Picchio¹, Laura E. Motta Milesi¹, I. Matías Ragessi¹ y Andrés Rodriguez^{1,2}

¹ Laboatorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, ana.picchio@mi.unc.edu.ar

²Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Córdoba, Argentina

Palabras clave: Resalto hidráulico, Vertedero Creager, Fluido Dinámica Computacional, Flujo a dos fases.

Resumen. Este trabajo presenta un modelo bidimensional de un perfil de vertedero, en específico el complejo hidroeléctrico de Salto Grande, conformado por una represa y central hidroeléctrica. El mismo se encuentra ubicado en el curso medio del río Uruguay, unos 15 km al norte de las ciudades de Salto (Uruguay) y Concordia (Argentina). Al pie del vertedero se encuentra un cuenco, en el que se disipa la energía del flujo por medio de un resalto hidráulico controlado, a efectos de aminorar potenciales problemas de erosión. El resalto se trata de un flujo rápidamente variado y no es posible caracterizar su comportamiento de manera analítica. Una alternativa, es modelar el comportamiento del flujo por medio de la fluidodinámica computacional (CFD). En este caso se utilizó de manera complementaria la aplicación Gmsh® y OpenFOAM®. Una para crear la malla y, el código, para simular el flujo con un esquema de solución interFoam: para 2 fluidos térmicos, incompresibles, inmiscibles y que utiliza el método Volume of Fluid (VOF) para capturar la interfaz. En las simulaciones se probaron diferentes resoluciones de malla y modelos de turbulencia para poder comparar tiempos, órdenes de convergencia y resultados. Los cuales se comparan con resultados publicados en bibliografía reciente y poder establecer cuál es la resolución adecuada y el modelo de turbulencia que mejor aproxima la evolución de interfaz agua-aire y el campo de velocidades en la zona del resalto.

Keywords: Hidraulic jump, Creager spillway Computational Fluid Dynamics, Two-phase flow.

Abstract. This work presents a two-dimensional model of a spillway profile, specifically that of the Salto Grande hydroelectric complex, which consists of a dam and a hydroelectric power plant. It is located in the middle course of the Uruguay River, about 15 km north of the cities of Salto (Uruguay) and Concordia (Argentina). At the foot of the spillway, there is a stilling basin where the energy of the flow is dissipated through a controlled hydraulic jump to mitigate potential erosion problems. The hydraulic jump is a rapidly varied flow, and its behavior cannot be characterized analytically. An alternative is to model the flow behavior through computational fluid dynamics (CFD). In this case, the Gmsh® application and OpenFOAM® were used complementarily. One to create the mesh, and the code to simulate the





flow with an interFoam solution scheme: for two incompressible, immiscible thermal fluids using the Volume of Fluid (VOF) method to capture the interface. Different mesh resolutions and turbulence models were tested in the simulations to compare times, convergence orders, and results. These are compared with results published in recent literature to establish the appropriate resolution and the turbulence model that best approximates the evolution of the water-air interface and the velocity field in the hydraulic jump area.

1. INTRODUCCIÓN

El complejo hidroeléctrico de Salto Grande posee un vertedero que cuenta con 361 metros de largo, con una capacidad de descarga de 60.000 m^3/seg . El mismo, permite laminar los caudales de crecida cuando superan la capacidad de las turbinas. Se caracteriza por ser de tipo Creager, con pared gruesa; es decir que su umbral tiene longitud suficiente para que se admita una distribucion hidrostática de presiones y altura considerable como para provocar el paso sobre él con régimen supercrítico.

El complejo hidroelectrico cuenta con 19 vanos para evacuar los caudales excedentes que se preducen por las crecidas del Río Uruguay (que se dan dos veces durante el año hidrológico). Cada uno de los mismos posee una compuerta radial destinada a regular la apertura y el volumen de agua a evacuar.

El flujo de agua se desarrolla sobre el vertedero primero sobre la rápida, donde el flujo posee un régimen supercrítico debido a la alta pendiente. Luego, se contiene un resalto hidráulico dentro del cuenco disipador de energía a efectos de aminorar la velocidades del flujo y evitar procesos erosivos. Es importante remarcar la existencia de dados de refuerzo y un umbral final. Finalmente, el flujo se incorpora al lecho natural del río.

El resalto hidráulico que se genera se caracteriza por ser un flujo permanente rápidamente variado que se produce en la transición entre régimenes de flujo supercrítico a subcritico. De esta manera, la corriente supercrítica de alta velocidad y poca profundidad que se observa en la rápida pasa súbitamente a una subcrítica de baja velocidad y tirante mayor. Viene acompañado de una fuerte disipación de energía del flujo. Al disminuir la velocidad del flujo, se previene la erosión al pié de la estructura de hormigón, garantizando su estabilidad.

El resalto hidráulico, se trata de un flujo rápidamente variado y no es posible caracterizar su comportamiento de manera analítica. Por lo tanto, entre las alternativas para hacerlo, se encuentran el uso de modelos físicos y experimentales; y modelos numéricos, por ejemplo el CFD.

En este trabajo se modeló el comportamiento del flujo a dos fases por medio de la fluidodinámica computacional, que permite realizar el estudio del mismo, caracterizar el campo de velocidades y las fluctuaciones turbulentas, al mismo tiempo que capturar con precisión la interfaz agua-aire (Ragessi et al.) El objetivo de este trabajo es, entonces, reportar los primeros avances en el estudio de los siguientes aspectos del vertedero:

- 1. La curva altura caudal del vertedero y su comparación con los datos de la Comisión Técnica Mixta; y,
- El comportamiento del resalto hidráulico en el cuenco disipador. En este último punto, se estudió su desarrollo en el cuenco, velocidades de entrada y salida del resalto y disipación de la energía.

2. MODELO NUMÉRICO

En este trabajo se utilizó Gmsh (R) (Geuzaine y Remacle, 2009) para resolver el mallado del dominio, el paquete de librerías de OpenFOAM (Open CFD,2005) para realizar las simulaciones y, finalmente, ParaView para postprocesar y visualizar los resultados.

Se realizó un modelo a dos fases (Aire-agua), con modelo de cierre kwSST, en una geometría simplificada 2D. Cabe destacar que se consideraron ambas fases con densidad constante. En la Figura 1 se observa un gráfico del vertedero modelado



Figura 1: Vertedero Salto Grande

2.1. Dominio geométrico y Discretización.

La malla estructurada se resolvió por medio de hexaedros regulares. Se trata de un modelo bidimensional, y el dominio tiene un ancho 1 m. Se realiza la suposición de que el canal modelado (de ancho unitario) representa un ancho de 1 m del vertedero, y los efectos de las paredes se desprecian mediante la condición: empty. Es decir, no se consideran los efectos de fricción de los tabiques que delimitan cada vano (Figura 2).



Figura 2: Malla del vertedero de Salto Grande

Se justifica la modelación bidimensional debido a que el objeto es analizar la curva alturacaudal y el comportamiento del resalto hidráulico: en particular su desarrollo logitudinal, variable que se mide en una única dirección.

Se realizó un análisis de convergencia de malla, para verificar la influencia del tamaño de las celdas en los resultados de la simulación. En este caso, se plantearon las mallas con distintos tamaños de celda en las direcciones "x, y", a saber de 20, 10 y 5cm de lado. Se verificó que entre malla y malla la diferencia entre el tamaño de las celdas sea al menos mayor al 30 %. Se logró observar que las longitudes representativas de las celdas eran suficientemenete diferentes calculando el radio de refinamiento, que debe ser mayor a 1,3 Ver Ec. (1) y (2):

$$r = \frac{\sqrt{\text{altura de malla de resolución baja}}}{\sqrt{\text{altura de malla de resolución media}}}$$
(1)

$$r = \frac{\sqrt{\text{altura de malla de resolución media}}}{\sqrt{\text{altura de malla de resolución baja}}}$$
(2)

donde las alturas representantivas de las mallas se definen como

$$h = A^{1/2} \tag{3}$$

por ser una malla rectangular.

Se verificó que el Error Relativo sea menor al 10 % para asegurar la independencia de resultados respecto de la resolución del mallado. Las diferencias relativas entre las mallas son 0.93 % y 7.49 %

2.2. Solver

El solver utilizado para realizar la modelación fué interFoam de OpenFOAM(R) que utiliza el método de volumenes finitos. Éste resolvió las ecuaciones de Navier Stokes para dos fluidos incompresibles isotérmicos e inmisicibles. Es decir, las propiedades de los materiales son constantes, excepto en la interfase. La ecuación de la continuidad está dada por:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

La ecuación de cantidad de movimiento usada está dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tij}) + \rho g_i + f_{\sigma i}$$
(5)

donde, u es la velocidad, ρ es la densidad, g_i es la gravedad, p es la presión, τ_{ij} es la tensión viscosa, τ_{tij} es la tensión turbulenta y $f_{\sigma i}$ es la tensión superficial.

La densidad es definida como:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2 \tag{6}$$

donde α toma valor de 1 a 0 dependiendo de la fase en la que está, y valores entre 0 y 1 en la interfase.

La tensión superficial se modela como una fuerza continua como

$$f_{\sigma_i} = \sigma_k \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \tag{7}$$

donde f_{σ} es la constante de tensión superficial y f_k la curvatura, dada por

$$k = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right)$$
(8)

Para la interfase se debe resolver una ecuación adicional para f_{α} (ver Ec. (9)):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{9}$$

2.3. Modelo de cierre

Con respecto al modelo de cierre, se optó por utilizar $\kappa\omega$ SST (Menter et altri, 2003) donde SST es por Transporte por Esfuerzo Cortante, (en inglés Shear Stress Transport). Este combina los modelos κ - ϵ y el modelo κ - ω . En las zonas cercanas a la pared, utiliza el modelo κ - ω y fuera de la capa límite κ - ϵ . El modelo resuelve dos ecuaciones de conservación: una para la energía cinética turbulenta y otra para la tasa específica de disipación. El modelo utilizado es el propuesto por Menter y Esch (2001), pero con los coeficientes actualizados presentados en The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html) y por Menter et. al., (2003). El término adicional F3 (Hellsten A., 1997) para paredes rugosas es igual a cero.

2.4. Condiciones iniciales y de borde

El esquema numérico para el modelo de cierre se requieren establecer condiciones iniciales y de borde para las variables fundamentales de presión (p), velocidad media (\overline{U}) , fase (α) energía cinética turbulenta (k), tasa de disipación específica de energía cinética turbulenta (ω) y viscosidad turbulenta (v_t) . Para lo cual, se determinan las superficies del dominio de la malla donde las condiciones de borde se definen; entrada, salida, aguas arriba, aguas abajo, salida y superficie (ver Figura 3).



Figura 3: Superficies donde las condiciones de borde se definen

De esta manera, los casos simulados contemplan un caudal constante en la entrada del dominio y en la salida, la altura del agua está definida por las condiciones de flujo. Por otra parte, en la superficie, la condición de borde se define por ser determinada por la presión atmosférica y en el fondo por tener características de pared a lo largo del vertedero. Las paredes laterales, en cambio, por ser un modelo bidimensional, la condición es definida como vacía (empty en el lenguaje computacional) con el propósito de ignorar el flujo a través de ellas. Las condiciones específicas usadas en los casos simulados de este trabajo son mostradas en la siguiente tabla:

Contorno / Superficie	α	U p		k	ω
Entrada	Variable Height Flow Rate	Variable Height Flow Rate Inlet Velocity flow Rate; 5.522	zeroGradient	fixedValue uniforme 0.0000013	fixedValue
Salida	zeroGradient (flujo libre)	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
Vertedero	zeroGradient	fixedValue	zeroGradient kqRWallFunction uniforme 1.35e-9		omegaWallFunction
Aguas arriba	zeroGradient	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Aguas abajo	zeroGradient	fixedVAlue	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction
Frente	empty	empty	empty	empty	empty
Fondo	empty	empty	empty	empty	empty
Superficie	Superficie inletOutlet pressureInletOutletVe locity		total Pressure	zeroGradient	inletOutlet

Figura 4: Condiciones específicas de contorno para cada variable

3. RESULTADOS

El modelo para las distintas mallas se corrieron lo suficiente hasta alcanzar un estado estacionario. Las secciones de interés son aguas arriba del umbral del vertedero (para verificar el nivel del agua), en la rápida (sobre el vertedero) y en el cuenco, aguas abajo del vertedero donde se desarrolla el resalto. Por lo que, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para las mismas en función del estudio que se realizó.

3.1. Curva altura caudal

En base a los resultados obtenidos se analisó la capacidad de vertido del perfil Creagar del vertedero de Salto Grande. En este caso se compara la altura de agua (H) que se obtuvo para cada caudal simulado con datos de la curva altura-caudal del vertedero obtenidos de una ecuación teórico y datos publicados por CTM - Salto Grande.

La ecuación teórica para el vertedero Creager establece la siguiente relación del caudal vertido:

$$Q = 23 \times 2 \times q \times K \times L \times h^{1,5} \tag{10}$$

donde h es la energía específica sobre el umbral, L la longitud útil del vertedero y k un coeficiente que, para el perfil Creager es del orden de 0.71.

La longitud útil del vertedero se calcula como:

$$L = L_n - 2 \times (nK_1 + K_2)$$
(11)

Con

$$L_n = L_0 - nb \tag{12}$$

donde n es el número de pilas, k_1 el coeficiente de contracción y k_2 el coeficiente del cajero.

Sin embargo, debido a que en el modelo numérico se planteó una franja entre tabiques de longitud unitaria; en el modelo teórico se definió de L = 1m a los fines de realizar la comparación.

Por otro lado, se utilizaron los datos del Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina, considerando la total abertura de las compuertas.

En la Figura 5 se compara la curva teórica que corresponde al vertedor tipo Creager, la carga H-Q que utiliza CTM - Salto Grande y la curva ajustada a partir de los resultados de la simulación 2D.



Figura 5: Curva teórica altura-caudal que corresponde al vertedero Creager

La diferencia máxima relativa es del 23 por ciento entre los caudales del modelo numérico y del modelo teórico para una altura sobre el cimacio de 2 metros. Esta diferencia máxima se observa para caudales medios y bajos, entre 50 y 5 m^3/seg .

Al día de la fecha el grupo de trabajo continúa trabajando sobre el modelo y espera resultados de simulaciones con caudales mayores: desde 50 hasta 150 m^3/seg .

3.2. Resalto hidráulico en el cuenco

El resalto hidráulico en la represa hidroeléctica de Salto Grande tiene como objetivo disipar la energía del agua y evitar la erosión aguas abajo de la estructura. Por lo tanto, con el fin de realizar el estudio del mismo, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos del flujo antes y después del salto de acuerdo con el modelo numérico para un caudal de 5,22 m^3/seg ver tabla 1. De manera gráfica se observa en la figura 6:

y_1 (m)	Fr_1	y_2 (m)	Fr_2	Longitud del resalto (m)
0.308	3.1	7.65	0.66	26.1

Tabla 1: Resultados numéricos



Figura 6: Imagen gráfica de los resultados obtenidos del modelo numérico con resolución de malla de 5cm

Una de las características básicas es la pérdida de energía, igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. Fenómeno que se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2} \tag{12}$$

Siendo y_1 el tirante antes del resalto hidráulico, y_2 tirante después del mismo Dando como resultado un total de 42.05 m N/N La potencia disipada es

$$Potencia = \gamma \cdot Q \cdot \Delta E \tag{13}$$

$$Potencia = 9806N/m^3 \cdot 5,22m^3/s \cdot 42,05mN/N = 2152,626MW$$
(13)

La pérdida relativa se define como $\Delta E/E_1$. A continuación se calculó de acuerdo con una curva teórica del Bureau of Reclamations dando un total de 26 % como se observa en la figura 7. Y con los resultados obtenidos del modelo numérico para el caudal de 5.22 m^3/seg , obteniendo un porcentaje del 23.52 %



Figura 7: Pérdida relativa de energía específica

Otro aspecto relevante en el estudio del resalto es el largo de su desarrollo. Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante el número de Froude F con una relación adimensional L/y_2 . De acuerdo con esta gráfica, se lo determinó con el fin de compararla con la del modelo numérico, como se observa en la Figura 8.



Figura 8: Longitud en términos de la profundidad secuente y2 de resaltos en canales horizontales

Como el valor que se obtuvo de la gráfica es 5.25 y el tirante subsecuente es 7.65, la longitud del resalto según el modelo teórico es 40,1625 m.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se reportan los primeros avances en la simulación bidimensional a escala de prototipo del flujo sobre el vertedero tipo Creager y cuenco disipador de CTM - Salto Grandre. En base a los resultados de la simulación, se observó que existe una diferencia máxima del 23 al comparar la curvas ajustadas por CTM - Salto Grande, la curva teórica y los resultados del modelo numérico. Esto es debido a que se desprecia la influencia de la fricción entre tabiques

propia de los vanos del vertedero en el modelo bidimensional. La diferencia observada de la longitud del resalto obtenida a través del modelo teórico con respecto al modelo numérico es debido a que el resalto se da dentro del cuenco disipador de energía; mientras que la curva teórica se configuró para canales horizontales. También se observa que, si bien de acuerdo con el modelo nos da un número de Froude que indica un resalto oscilante, se trata en realidad de uno estable debido a la configuración de la obra civil con el cuenco de disipación de energía.

REFERENCIAS

Ragessi, I. M., Márquez Damián, S., Guilleń, N., Pozzi Piacenza, C., García, C. M. y Hillman, G. (2014). "Validación de un modelo numérico para la caracterización hidráulica de las obras de evacuación de la presa Los Molinos – Jujuy", Mecánica Computacional Vol XXXIII, pp. 337-347, Bariloche, Argentina.

Laura E. Motta Milesi, I. Matías Ragessi, Candelaria Joaquin, Leticia Tarrab ,Román G. Martino, , Gerardo Hillman y Andrés Rodriguez. (2023) .^{Es}tudio nmérico-experimental para evaluar la influencia de macorrugosidades en flujos a escala de laboratorio.^Asociación Argentina de Mecánica Computacional Vol. XL

OpenCFD. (2005) http://www.opencfd.co.uk/openfoam/.

OpenFOAM® (2023). https://www.openfoam.com/

Página oficial de Salto Grande https://www.saltogrande.org/

Vallarino, R. (1998). Tratado básico de presas (Tomo 2). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Ven Te Chow (1994) Hidráulica de Canales Abiertos Mc Graw - Hill Interamericana S. A.

López F., Rodríguez A., y Doling, O. R. (2011). Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.