

VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE EVACUACIÓN DE LA PRESA LOS MOLINOS - JUJUY

**I. Matias Ragessi^{a,c}, Santiago Márquez Damián^b, Nicolas Guillén^{a,c}, Cecilia
Pozzi Piacenza^a, Carlos Marcelo García^{a,c}, y Gerardo Hillman^a**

^a*Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica, F.C.E.F.yN.,
Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina,
matiasragessi@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu/>*

^b*Centro de Investigación de Métodos Computacionales, Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta
Nac 168, Km 472, Paraje El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina.*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET.*

Keywords: Flujos turbulentos, obras hidráulicas, flujo a dos fases.

Resumen. En este trabajo se reportan avances en el proceso de validación del esquema computacional adoptado para simular flujos turbulentos a superficie libre en obras de evacuación de excedentes hídricos de la Presa Los Molinos. Esta presa está localizada un kilómetro aguas abajo de la confluencia de los ríos Reyes y Grande en la provincia de Jujuy, Argentina. Actualmente, la presa y sus obras de evacuación presentan dificultades en su operación debido a la colmatación con sedimentos en la región aguas arriba de la presa, la existencia de erosiones significativas aguas debajo de la presa y desgaste en la estructuras de descarga de la presa por abrasión. Para evaluar el diseño propuesto para dar solución a esta problemática, se construyó un modelo físico tridimensional de la Presa Los Molinos en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. En este modelo físico se evaluaron los patrones de flujo turbulento para distintas condiciones experimentales utilizando la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV por sus siglas en inglés). Además se registraron parámetros hidráulicos particulares que describe el funcionamiento de las obras de evacuación (tirantes, caudales volumétricos, longitud de salto, etc.).

Sobre la base de las observaciones experimentales para el diseño propuesto, se implementó un modelo numérico que una vez validado permitirá evaluar alternativas de diseño en obras hidráulicas de este tipo. El esquema de modelación utilizado que permite resolver la ecuaciones para flujo a dos fases (agua-aire), pertenece al paquete de código libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation). El modelo numérico se validó utilizando las condiciones experimentales evaluadas en el modelo físico, contrastando campos de velocidad media, zonas de recirculación y separación del flujo, caudales volumétricos de flujo, etc.

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo se desarrolla en el marco de un proyecto que evalúa la viabilidad técnica, económica y socio-ambiental de la refuncionalización y mejora de la presa derivadora Los Molinos y el canal del Río Grande. La presa derivadora Los Molinos está ubicada sobre el Río Grande, a pocos kilómetros aguas arriba de la ciudad San Salvador de Jujuy, capital de la provincia de Jujuy, y aproximadamente 1 kilómetro aguas abajo de la confluencia del Río Reyes con el Río Grande. Su finalidad principal es la derivación de un caudal máximo de 25 m³/s al canal Río Grande, que luego de un recorrido de 32 kilómetros de extensión desemboca en el embalse La Ciénaga. La presa está constituida por un terraplén de materiales sueltos y dos vertederos, un tramo a nivel fijo (ver Dique Fijo, en Figura 1) y otro controlado por compuertas del tipo segmento circular (ver Dique Móvil, en Figura 1). Los dos vertederos se prolongan aguas abajo con cuencos disipadores de energía de distinto tipo. Sobre la margen derecha se ubica la toma del canal Río Grande y un canal de limpieza (ver Canal Moderador, en Figura 1) adjunto al vertedero con compuertas. La Figura 1 muestra una planimetría general de la obra, indicándose las distintas estructuras que la componen. Actualmente, la presa y sus obras de evacuación presentan dificultades en su operación debido a la colmatación con sedimentos aguas arriba de la presa, erosiones significativas aguas abajo y desgaste de la presa por abrasión. Con el objetivo de evaluar el diseño propuesto para dar solución a esta problemática, se construyó un modelo físico tridimensional de la Presa Los Molinos en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Se evaluaron en ese modelo físico, los patrones de flujo turbulento para distintas condiciones experimentales.

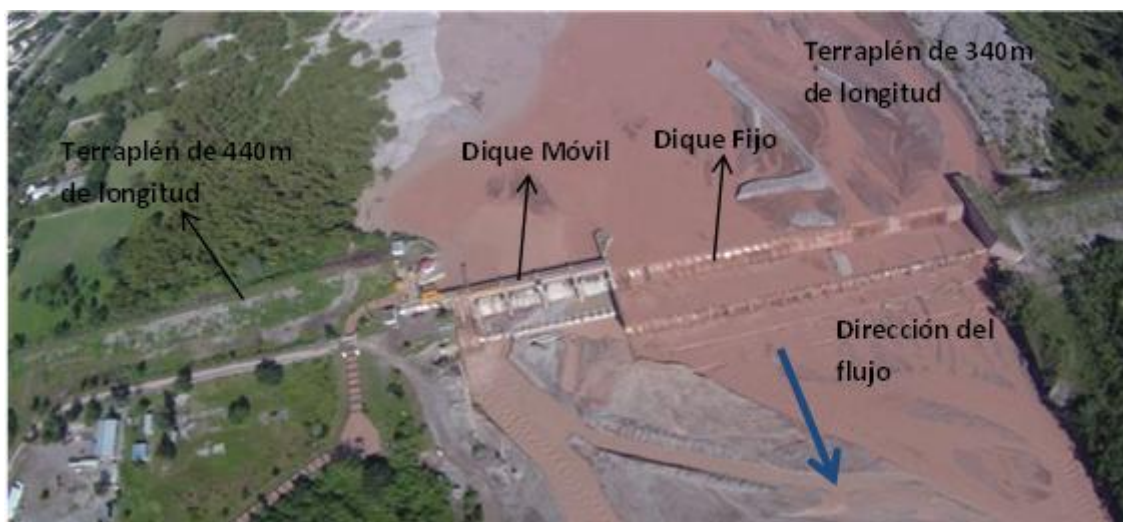


Figura 1: Fotografía aérea de la obra. Vista de todas las estructuras componentes de la misma.

El objetivo de este trabajo es reportar avances en el proceso de validación de un modelo numérico implementado para simular flujos turbulentos a superficie libre en las obras de evacuación de la Presa Los Molinos. En particular este trabajo se enfoca en la caracterización hidráulica del perfil lanzador del Canal Moderador (ver Figura 2). En la validación de la simulación numérica se utilizó la caracterización experimental del flujo lograda en la

modelación física tridimensional.

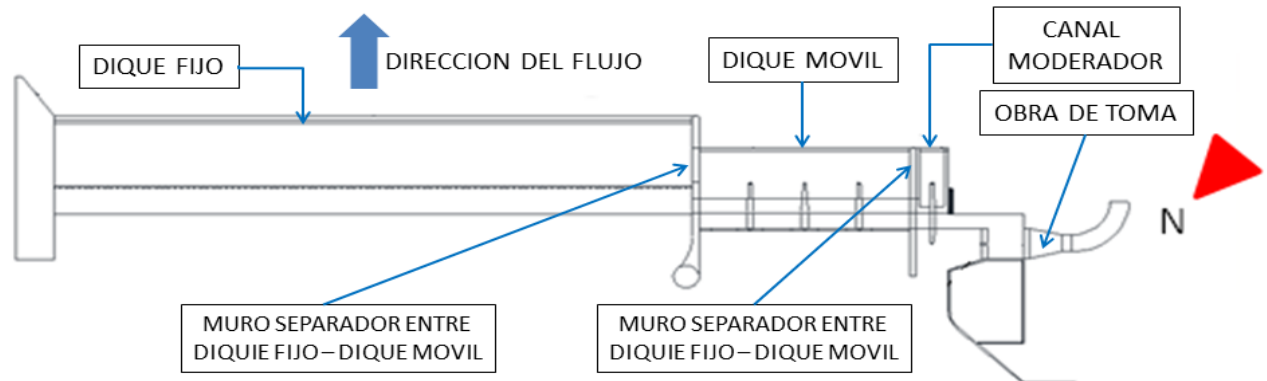


Figura 2: Esquema en planta de todas las obras de evacuación de la Presa Los Molinos.

En la sección 2 de este trabajo se presenta la caracterización experimental del flujo, realizada mediante la modelación física tridimensional de la Presa Los Molinos. Se modeló experimentalmente uno de los diseños propuestos para el perfil lanzador del Canal Moderador y se evaluó: 1) capacidad de erogación (relación H-Q de cada perfil); 2) velocidades en la estructura (velocidades máximas observadas sobre la estructura); y 3) distancia de lanzamiento del chorro. En la sección 3 se presenta el modelo numérico utilizado que se basa en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS), con un modelo de cierre turbulento de dos ecuaciones $k - \varepsilon$ estándar (donde k es la energía cinética turbulenta y ε es la tasa de disipación de esa energía turbulenta). En la sección 4 se presentan los resultados de la validación del modelo numérico, contrastando el comportamiento del flujo en el salto y la distancia de despegue del flujo aguas abajo del salto esquí con los resultados experimentales.

2 ESTUDIO EXPERIMENTAL

Este estudio se desarrolló en el Modelo Físico Presa Los Molinos construido en el predio del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. El modelo físico construido es un modelo froudiano tridimensional con escala 1:65 no distorsionada. La escala fue seleccionada en función del espacio disponible, la capacidad de bombeo existente en el Laboratorio de Hidráulica y los efectos de escala. El modelo cuenta con un fondo móvil rigidizado aguas arriba de la presa, al cual posteriormente se le quitó dicha rigidización para el estudio del transporte de sedimentos y un fondo móvil aguas abajo el cual permitió cuantificar las erosiones.

La geometría del modelo tiene una planta en forma de “L” con dimensiones características de 26.4 x 20.8 m en las direcciones principales, quedando fuera de éstas las cámaras de ingreso y salida del modelo. La superficie total de modelación es de 258 m² que en prototipo representa 1.10 km². En la Figura 3 se muestra las estructuras de evacuación de la presa con las modificaciones a evaluar experimentalmente.



Figura 3: Representación de las estructuras de evacuación en el Modelo Físico Presa Los Molinos.

El *Modelo Físico Presa Los Molinos* permitió caracterizar el comportamiento hidráulico de las obras de evacuación de la presa. En particular, para uno de los diseños del perfil lanzador del *Canal Moderador* (ver Figura 6) se determinó la curva característica que vincula altura – caudal evacuado (H-Q) de cada diseño por separado, y la curva característica que vincula caudal evacuado con la distancia a la cual cae el flujo de agua luego de atravesar el salto esquí (Q – D). Para construir las curvas características del perfil, se hizo variar el caudal Q y se relevaron experimentalmente tanto la altura H como la distancia D.

Las variables Q, H y D se determinaron con la siguiente metodología experimental: 1) mediante cámaras aforadoras que tienen dos vertederos triangulares de pared delgada (se seleccionó triangular ya que el mismo es muy sensible frente a pequeñas variaciones de caudal) se determinaron los caudales Q que se representan en el modelo; 2) la altura H se midió con una escala graduada al milímetro, ubicada en la margen derecha de la obra de descarga (ver *Margen Derecha CM* en Figura 4); y 3) la distancia de despegue del flujo aguas abajo del salto esquí (D), se midió con una regla graduada al milímetro según el esquema representado en la Figura 5.



Figura 4: Escalas graduadas definidas en el modelo que permiten medir la altura H.

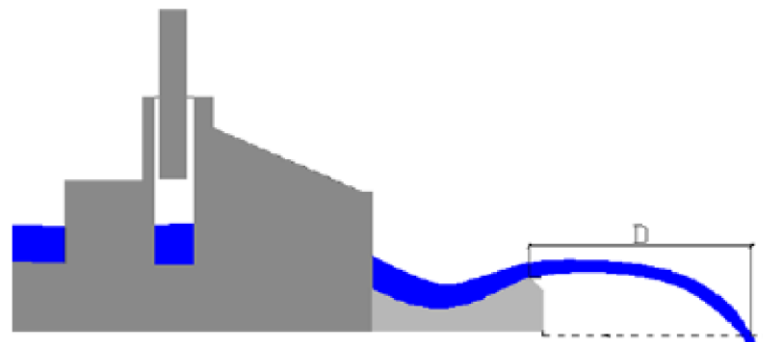


Figura 5: Esquema de medición de la distancia de salto D en el perfil lanzador del Canal Moderador.

La Tabla 1 muestra las condiciones ensayadas para evaluar experimentalmente el diseño propuesto para el perfil lanzador del Canal Moderador (ver Figura 6).

Tabla 1: Condiciones ensayadas para el el perfil lanzador del Canal Moderador.

Caso N°	Q en prototipo (m ³ /s)	H en modelo (cm)	U en modelo (m/s)	Longitud de Salto en modelo (cm)
1	57	5.38	0.477	12.0
2	108	8.77	0.555	19.5

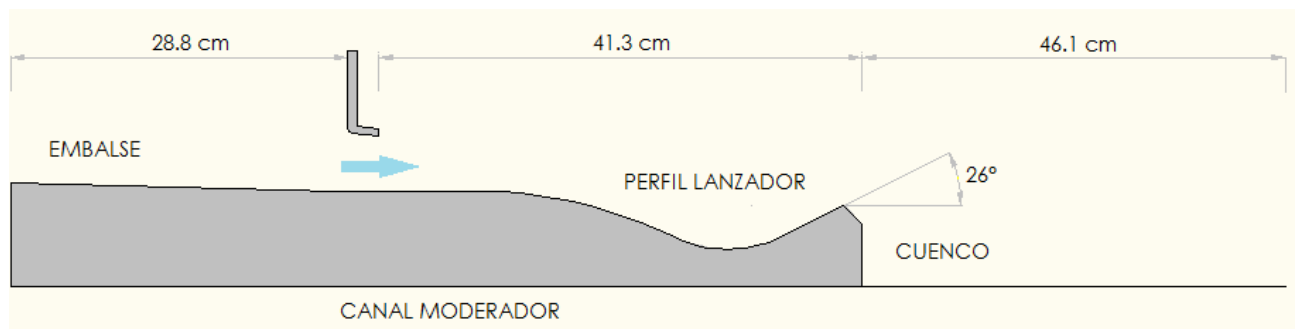


Figura 6: Esquema del diseño modelado del perfil lanzador del Canal Moderador.

3 MODELADO NUMÉRICO DEL FLUJO TURBULENTO

3.1 Descripción del modelo utilizado

En este estudio se implementó un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD. <http://www.open CFD.co.uk/openfoam/>).

Se utilizó el código interFoam de OpenFOAM® que aplica para una malla de volúmenes finitos y dos fluidos incompresibles, isotérmicos y no miscibles con un enfoque de captura de la interfaz basada en la fracción de fase. Se utilizó el algoritmo “PressureImplicitwithSplitting of Operators” de Issa (1986), como esquema de cálculo para la presión y la velocidad, el cual se adapta con éxito para la solución iterativa de problemas de estado estacionario (Versteeg and Malalasekera, 2007). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ estándar (Launder y Sharma, 1974). La implementación del modelo numérico fue del tipo bidimensional (en la longitudinal y en la vertical) para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio.

Con una estrategia que complementa modelación física y numérica, Badano et al. (2013) verificaron la capacidad de descarga y evaluaron alternativas de diseño para el vertedero Gatun, mediante modelos numéricos bidimensionales y tridimensionales a dos fases (agua-aire) utilizando el código OpenFOAM®. Este mismo código usó Gerbec et al. (2013) para validar un modelo tridimensional para el diseño del aliviadero de la presa Gauguí, sobre el Río Camú en República Dominicana. Utilizando la técnica de volúmenes finitos y un modelo basado en las RANS con un modelo de cierre turbulento $k - \epsilon$ estándar, Jorabloo et al (2011) modelaron el comportamiento del flujo en un salto esquí y lograron validar el modelo en base a datos experimentales. Estos antecedentes indican lo acertado de una estrategia de complementar modelos numéricos y físicos para evaluar alternativas de diseño en este tipo de obras hidráulicas. Además, muestran que el código abierto OpenFOAM® presenta un buen comportamiento para estudiar este tipo de fenómenos de flujo a dos fases.

3.2 Generación de la malla de elementos

La geometría del dominio presenta formas complejas por lo que se optó por trabajar con el malladorGmsh®. La discretización espacial del dominio se realizó mediante un mallado estructurado, y los volúmenes que lo componen son de tamaño variable: en la zona cercana a la entrada del dominio (*Inlet* en Figura 6) los volúmenes tienen un tamaño de 5 a 3 mm de lado; en la zona de la embocadura al *perfil lanzador* (ver Figura 7a) los volúmenes tienen 2 mm de lado; y en la zona final del *perfil lanzador* y el *cuenco* de caída del flujo (ver Figura 7b) los volúmenes tienen entre 1 y 0.5 mm de lado. Es decir, se densificó la malla a medida que el flujo avanza a lo largo del perfil lanzador del Canal Moderador. Una vez terminada la malla se la exportó con la aplicación gmshToFoam de OpenFoam®.

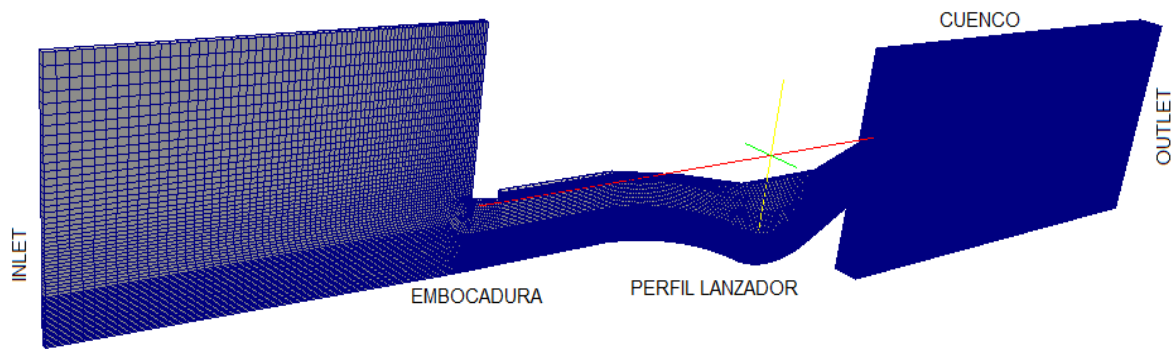


Figura 6: Perspectiva de la malla implementada para el modelo bidimensional. El sentido del flujo es de entrada a salida (*INLET - OUTLET*).

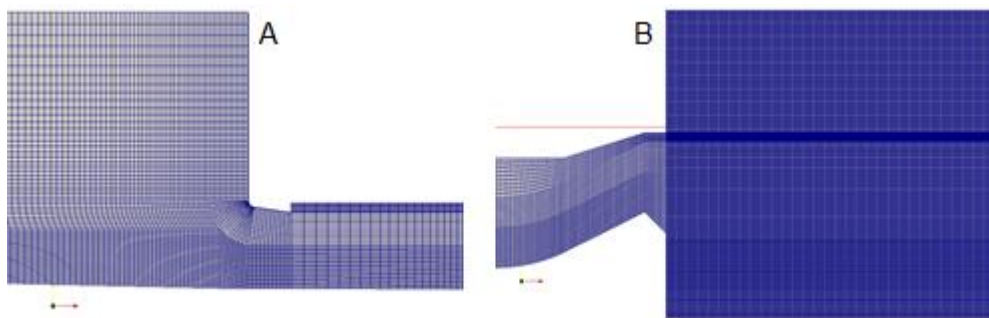


Figura 7: a) Zona de embocadura al perfil lanzador del Canal Moderador; b) Transición del perfil lanzador al cuenco de caída del flujo

La malla de volúmenes óptima seleccionada para el modelo bidimensional es el resultado de un análisis de convergencia en malla para las variables del flujo medio y la energía cinética turbulenta. Se adoptó entonces la malla que mejores tiempos de computo reportó manteniendo un acuerdo razonable en resultados con la que poseía el mayor refinamiento.

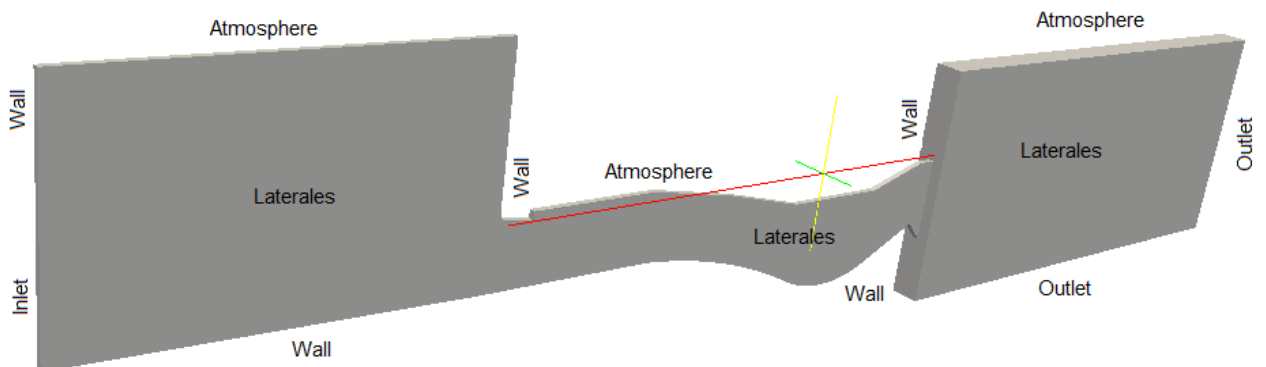
En cuanto a la resolución temporal, se configuró que el paso de tiempo se ajuste a medida que avanza en la simulación numérica. El paso de tiempo debe cumplir dos condiciones: 1) que el número de Courant no supere el valor de 0.4 para todo el dominio; y 2) que el paso de tiempo no sea mayor que 1 segundo (paso de tiempo máximo para que no supere el intervalo de escritura del modelo).

3.3 Condiciones iniciales y de borde

El esquema de simulación utilizado requiere establecer condiciones de iniciales y de borde para las variables fundamentales: α (fase), energía cinética turbulenta (k), tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ), presión (p_{rgh}) y velocidad (U). La Tabla 2 y la Figura 8 detallan las condiciones de borde adoptadas en las regiones del dominio. Los valores iniciales de todas las variables son iguales a cero en todo el dominio, con excepción de α que se estableció su valor igual a 1 (equivalente a fase agua) en las zonas de entrada y el embalse hasta la embocadura al perfil del *Canal Moderador* (ver Figura 8).

Tabla 2: Condiciones de Borde adoptadas en cada una de las regiones de la malla.

patch	variable				
	α	ϵ	k	p_rgh	U
Laterales	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	slip
Atmosphere	InletOutlet	InletOutlet	InletOutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
Outlet	InletOutlet	InletOutlet	InletOutlet	bouyantPressure	inletOutlet
Inlet	fixedValue	fixedValue	fixedValue	bouyantPressure	fixedValue
Walls	zeroGradient	epsilonWallFunction	kqRWallFunction	bouyantPressure	fixedValue

**Figura 8:** Condiciones de Borde adoptadas en cada una de las regiones de la malla.

Es necesario aclarar que para la condición de borde en la entrada *Inlet* se utilizó un perfil medio de velocidad. Este perfil se estimó en función de la velocidad media y la altura H (medida en el modelo físico, ver sección 2) para los tres caudales modelados. Los valores de la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación en la entrada *Inlet* fueron $1e-3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y $8e-5 \text{ m}^2/\text{s}^3$, respectivamente. Estos valores se estimaron en función de la velocidad media del flujo.

En las paredes *Wall* la velocidad U es igual a cero, y se utilizó las funciones *kqRWallFunction* y *epsilonWallFunction* para k y ϵ respectivamente. Estas son funciones estándar de la librería de *openFoam*® que establecen la ley con la cual varía la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación a medida que se aproxima a la pared.

En la Figura 8 se puede observar un ensanchamiento del dominio en la zona del cuenco donde cae el flujo. Este diseño permite que el chorro de salida del perfil lanzador incorpore

aire, para que el flujo no se adhiriera a la pared vertical del cuenco y afecte la distancia (D) de despegue del flujo. Además, la condición de deslizamiento (slip) para la velocidad U en las paredes *Laterales* permite que el flujo interno no sea afectado por los esfuerzos de corte en estas paredes.

4 RESULTADOS

A continuación se presentan los avances obtenidos en el proceso de validación del esquema de modelación utilizando los datos experimentales registrados (ver Tabla 1 en sección 2). Se realizó un análisis cualitativo del comportamiento del flujo en la zona de embocadura y el perfil lanzador del Canal Moderador, y en particular, se comparó la distancia de despegue del flujo (D) aguas abajo del salto esquí en modelo físico y numérico.

Las Figuras 9 y 10 muestran el campo de flujo resultante del modelo numérico para los Casos N°1 y N°2 (ver Tabla 1), respectivamente. En el Caso N°1, tanto en el modelo numérico como en el ensayo en el modelo físico, se pudo observar que el flujo en la embocadura funciona a superficie libre y que la superficie libre copia la forma del perfil lanzador del *Canal Moderador* en toda su longitud (ver Figura 9). Además, la distancia de despegue del flujo (D) aguas abajo del salto esquí resultó ser 15 cm y 12 cm para el modelo numérico y modelo físico, respectivamente.

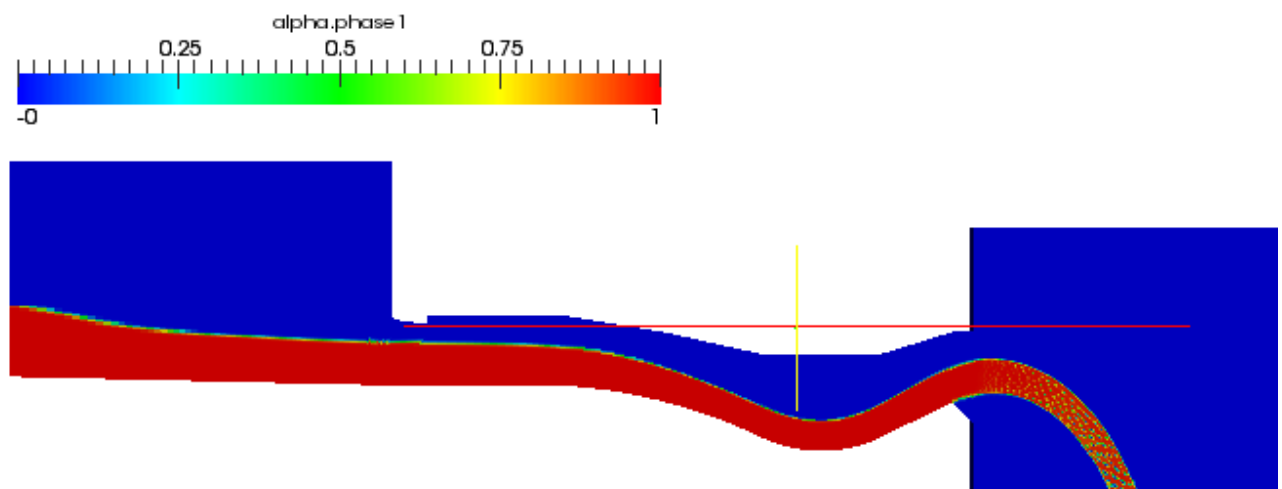


Figura 9: Resultados Caso N°1. Comportamiento de la superficie libre en el modelo bidimensional. En la escala el cero corresponde a la fase aire y el uno corresponde a la fase agua.

En el Caso N°2, se pudo observar que el flujo ahoga la embocadura que funciona a presión y que la superficie libre copia la forma del perfil lanzador del *Canal Moderador* en toda su longitud (ver Figura 9), tanto en el modelo numérico como en el modelo físico. Además, la distancia de despegue del flujo (D) aguas abajo del salto esquí resultó de 15 cm y 19.5 cm para el modelo numérico y modelo físico, respectivamente.

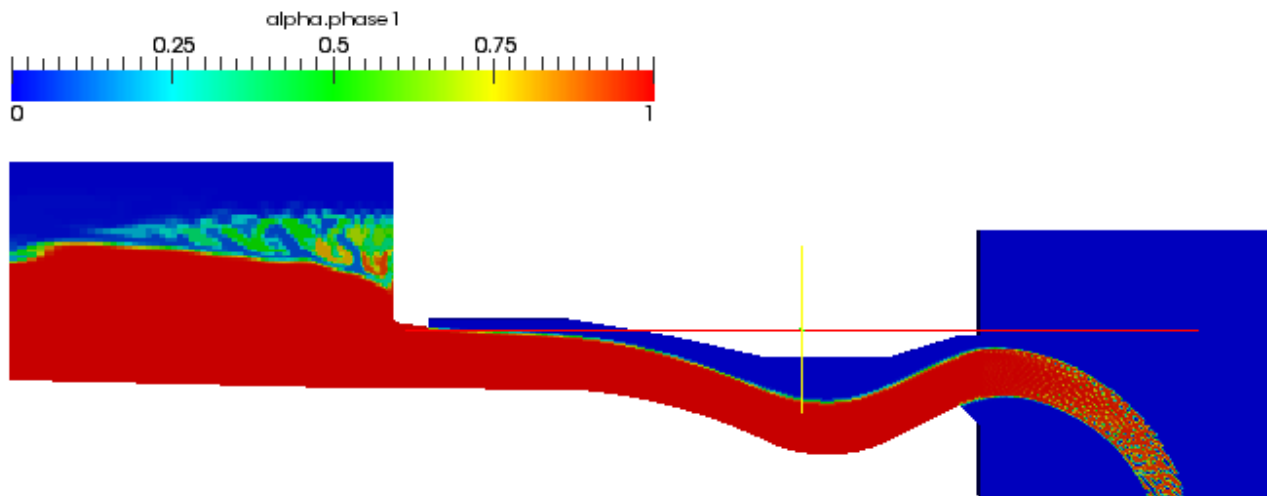


Figura 10: Resultados Caso N°2. Comportamiento de la superficie libre en el modelo bidimensional. En la escala el cero corresponde a la fase aire y el uno corresponde a la fase agua.

La Tabla 3 compara los resultados experimentales y numéricos para los Casos N°1 y N°2. Es necesario aclarar que, tanto en el modelo físico como el modelo numérico, el flujo al final del tramo del perfil lanzador no se ahoga y despega sin pegarse a la pared inferior del cuenco disipador. Además, las diferencias observadas en la longitud de salto entre el modelo numérico y modelo físico, plantean la necesidad de continuar con el proceso de validación del modelo numérico bidimensional.

Tabla 2: Condiciones de Borde adoptadas en cada una de las regiones de la malla.

Caso N°	Longitud de Salto en modelo físico (cm)	Longitud de Salto en modelo numérico (cm)
1	12	15
2	19.5	15

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presentaron avances en el proceso de validación de un modelo numérico computacional, basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS), implementado para simular flujos turbulentos en a lo largo del perfil lanzador del Canal Moderador del Modelo Físico Los Molinos. El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ estándar. El modelo numérico fue validado utilizando los datos experimentales registrados en

modelo físico. Los principales resultados obtenidos durante la validación del modelo bidimensional permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

- El análisis cualitativo indica que el comportamiento del flujo en la embocadura y a lo largo del perfil lanzador es similar en modelo físico y modelo numérico. El flujo en el tramo final del perfil lanzador no se ahoga y despega sin pegarse a la pared, esto se observó tanto en modelo numérico como en modelo físico.
- Las diferencias observadas en la longitud de salto entre el modelo numérico y modelo físico, plantean la necesidad de continuar con el proceso de validación del modelo numérico bidimensional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Launder, B. E., y Sharma, B. I. (1974). "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, vol. 1, no. 2, pp. 131-138.
- OpenCFD Ltd. (2005). Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. Tech.Rep. TR/HGW/02, 2005.
- OpenCFD. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>.
- Versteeg H. K. and Malalasekera W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, Second Edition, 2007.
- Laboratorio de Hidráulica (2014). Informe "Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador los molinos, provincia de Jujuy". Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, febrero 2014.
- Badano Nicolás D., Sabarots Gerbec Martín, Menéndez Ángel Nicolás (2013). "Modelación numérica de vertederos para la verificación de la capacidad de descarga y evaluación de alternativas". VII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos 2013. San Juan, 13 y 16 de noviembre de 2013.
- Gerbec Martín Sabarots, Fattor Claudio, Badano Nicolás D., Díaz Ruiz Ramiro, Menéndez Ángel N., y Bacchiega Daniel (2013). "Complementación entre modelación física y matemática para la evaluación hidrodinámica de una rápida de desarrollo curvo". XXIV° Congreso Nacional del Agua 2013. San Juan, 14 al 18 de Octubre de 2013.
- Issa, R. I. (1986). "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting". *J. Comput. Phys.*, Vol. 62, pp. 40–65.
- M. Jorabloo, R. Maghsoodi, and H. Sarkardeh (2011). "3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams". *Journal of American Science* 2011;7(6):931-936. (ISSN: 1545-1003).