

Validación de un modelo CFD para la predicción de la dinámica de la superficie libre en resaltos hidráulicos

Leiza D'Angelo¹, Paula Consoli Lizzi¹, Sergio Liscia¹

¹UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
leizadangelo@gmail.com

1. Introducción

Los resaltos hidráulicos son fenómenos fundamentales en la ingeniería hidráulica, caracterizados por la transición de un flujo supercrítico a uno subcrítico, donde se produce un incremento rápido del tirante, con disipación de energía e incorporación de aire. La elevada turbulencia generada induce fluctuaciones significativas en la superficie libre, cuya caracterización precisa resulta determinante para el dimensionamiento óptimo de estructuras hidráulicas como cuencos disipadores de energía.

Este trabajo implementa y valida un modelo CFD basado en ecuaciones RANS con un tratamiento específico de la interfaz aire-agua, para números de Froude (Fr) entre 3.32 y 8.48. El dominio computacional utilizado (Fig. 1) representa un canal rectangular con condiciones iniciales y de contorno que reproducen fielmente las configuraciones experimentales de referencia.

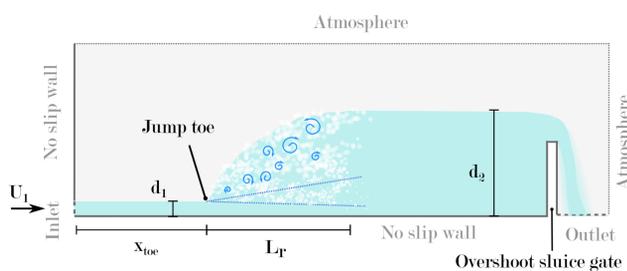


Figure 1: Esquema del dominio computacional.

Referencia	Fr_1	d_1 [m]	U_1 [m/s]
Este estudio	3.32	0.041	2.10
	4.8	0.021	2.19
	5.1	0.018	2.12
	6.33	0.014	2.34
Wang et al. (2014) [1]	5.1	0.02	2.26
	8.5	0.02	3.78
Murzyn et al. (2009) [2]	3.1	0.018	1.3
	4.2	0.018	1.76
	5.3	0.018	2.23
	6.4	0.018	2.69

Table 1: Resumen de los casos experimentales seleccionados para la validación.

2. Metodología

2.1. Descripción del modelo teórico

Se utilizó un modelo de mezcla trifásica [3] (aire continuo, burbujas y agua) que resuelve cuatro ecuaciones de conservación acopladas. La ecuación principal que gobierna la conservación de masa para la mezcla agua-burbuja es:

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_m \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\alpha_m (1 - \alpha_m) \mathbf{u}_{m-a}] = S_b \quad (1)$$

donde α_m es la fracción de volumen de la mezcla agua-burbuja, \mathbf{u} es la velocidad promedio de la mezcla trifásica, \mathbf{u}_{m-a} es la velocidad relativa entre la mezcla agua-burbuja y el aire continuo, y S_b es el término fuente (incorporación/eliminación de aire). Este planteo permite capturar el fenómeno de esponjamiento de la superficie libre, característico de los resaltos hidráulicos.

2.2. Validación del modelo numérico

La validación se basó en comparaciones sistemáticas entre resultados numéricos y experimentales (Refs. [1]-[2]), a través de:

- Comparación del perfil promedio de la superficie libre
- Procesamiento estadístico de señales para cuantificar correlaciones espaciales y temporales
- Análisis espectrales para caracterizar la dinámica oscilatoria del resalto

3. Resultados

3.1. Posición media de la superficie libre

Los resultados numéricos muestran una buena concordancia con los datos experimentales (Fig. 2). La adimensionalización

de las variables permite una comparación directa entre casos con diferentes condiciones de flujo. El modelo captura tres aspectos fundamentales:

- La evolución del perfil de superficie libre a lo largo del resalto
- El incremento en la altura máxima del resalto con el número de Froude
- La longitud característica del resalto hidráulico

A pesar de la concordancia general, en la región cercana al pie del resalto el modelo numérico tiende a sobrestimar la elevación de la superficie libre. Esto puede atribuirse a dos mecanismos principales: (i) el efecto de esponjamiento causado por la alta incorporación de aire en el punto de impacto, y (ii) limitaciones inherentes al marco algebraico del método VOF, que produce difusión numérica aumentando artificialmente el espesor de la interfaz.

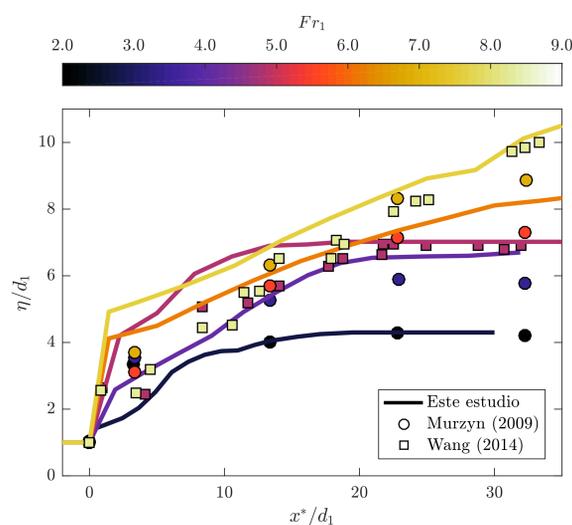


Figure 2: Comparación entre perfiles medios adimensionales de superficie libre (η/d_1) obtenidos numéricamente y datos experimentales para diferentes números de Froude, en función de la posición adimensional $(x - x_{toe})/d_1$.

3.2. Correlación cruzada

Se correlacionaron las posiciones horizontales del pie del resalto con la posición de la superficie libre en distintas secciones transversales para cada caso (Fig. 3).

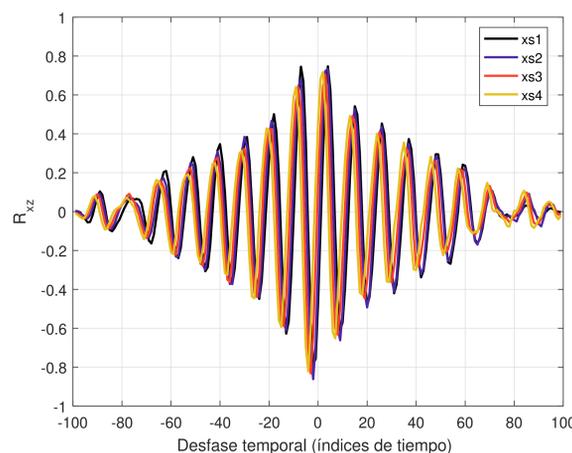


Figure 3: Correlación cruzada entre la posición del pie del resalto y la elevación de la superficie libre para $Fr = 7.5$ en cuatro secciones transversales.

El análisis revela tres características principales:

- Un máximo de correlación entre 0.7-0.85 cerca del desfase cero, indicando una respuesta casi inmediata de la superficie libre ante las fluctuaciones del pie del resalto
- Una estructura oscilatoria periódica que evidencia el acoplamiento hidráulico entre el movimiento del pie del resalto y las ondulaciones superficiales
- Una atenuación gradual de la correlación con el aumento del desfase temporal, consistente con el comportamiento esperado en sistemas hidrodinámicos con disipación

3.3. Análisis espectral

La figura 4 sintetiza el análisis espectral mediante números adimensionales. Se identifica un único pico de frecuencia dominante en las simulaciones numéricas ($St \approx 0.007 - 0.013$), correspondiente al patrón oscilatorio macroscópico del resalto. Los resultados experimentales, sin embargo, revelan dos frecuencias características: una primaria ($St \approx 0.01 - 0.03$) asociada a fluctuaciones locales de alta frecuencia, y una secundaria ($St \approx 0.005 - 0.015$) que coincide con nuestros resultados numéricos. Esto evidencia que el modelo RANS es capaz de capturar las estructuras coherentes de gran escala, mientras que filtra las altas frecuencias asociadas a fenómenos turbulentos de menor escala.

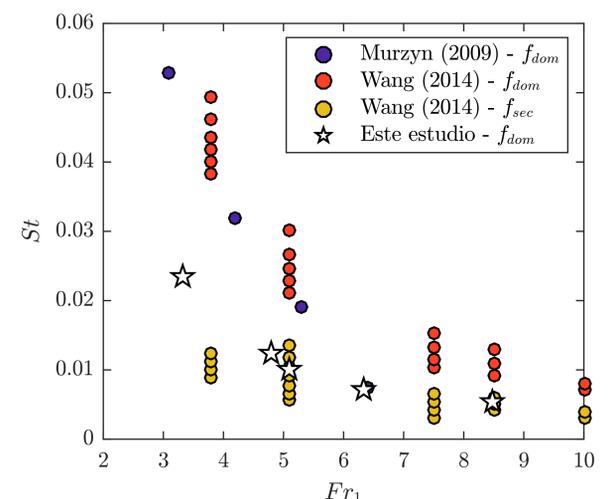


Figure 4: Número de Strouhal ($St = f d_1 / U_1$) vs número de Froude (Fr). Resultados numéricos y datos experimentales de frecuencias dominantes y secundarias.

4. Conclusiones

- El modelo demostró notable capacidad para reproducir los perfiles medios de superficie libre, capturando correctamente la evolución espacial del resalto y su dependencia con el número de Froude.
- El análisis de correlación cruzada reveló un fuerte acoplamiento entre el movimiento del pie del resalto y las fluctuaciones de la superficie libre, con coeficientes máximos entre 0.7-0.85, confirmando la interdependencia física de estos fenómenos.
- Las frecuencias dominantes obtenidas numéricamente coinciden con las frecuencias secundarias experimentales, evidenciando que el modelo RANS captura preferentemente los fenómenos de gran escala mientras filtra las oscilaciones de alta frecuencia asociadas a estructuras turbulentas locales.
- Los resultados validan la aplicabilidad del modelo para el estudio de la dinámica de superficie libre en resaltos hidráulicos, ofreciendo una alternativa computacionalmente eficiente para aplicaciones de ingeniería hidráulica.

5. Trabajo Futuro

- Implementación de simulaciones 3D para capturar efectos no representables en modelos 2D, incluyendo estructuras vorticiales transversales
- Evaluación de diferentes modelos de turbulencia
- Aplicación del modelo a configuraciones geométricas complejas y análisis de efectos de escala

Referencias

- [1] H. Wang, "Turbulence and air entrainment in hydraulic jumps", PhD Thesis, PhD thesis, The University of Queensland, 2014. DOI: 10.14264/ug1.2014.542.
- [2] F. Murzyn and H. Chanson, "Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental observations", In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 33:7 (2009), pp. 1055-1064. DOI: 10.1016/j.expthermfluidsc.2009.09.004.
- [3] F. Zabaleta, S. Márquez Damán, and F. A. Bombardelli, "A novel three-phase mixture approach for the numerical modeling of self-aerated flows", In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 408 (2023), p. 115958. DOI: 10.1016/j.cma.2023.115958.