

CARACTERIZACION EXPERIMENTAL Y SIMULACION NUMERICA DE FLUJOS DE ALTA TURBULENCIA: RESALTO SUMERGIDO

de Dios Mariano, Bombardelli Fabián A., Liscia Sergio O. y Lopardo Raúl A.

UIDET Hidromecánica, Calle 47 N° 200, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
(+54) 0221-4236684, dediosmariano@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, gracias al avance en las técnicas de medición en laboratorio se ha logrado tener acceso al conocimiento de flujos turbulentos con una mayor profundidad. En este sentido estudios sobre el campo de velocidades instantáneas del flujo turbulento en el resalto hidráulico han sido realizados a partir de diferentes técnicas: Hilo-caliente (Rouse et al., 1958; Resh, 1972a), Anemometría Laser Doppler (Long et al., 1990; Svendsen et al., 2000), Velocimetría por Imágenes de Partículas (Lennon and Hill, 2006; Misra et al., 2008; Lin et al., 2012) y Velocimetría Acústica Doppler (Liu et al., 2004; Zare and Baddour, 2007; Dey and Sarkar, 2008).

Por otro lado, el estado del arte de la mecánica de fluidos computacional (CFD) ha alcanzado un desarrollo sustancial gracias al avance en el conocimiento de los métodos numéricos, al progreso de la tecnología computacional y la mejoría de los modelos de turbulencia. De este modo las simulaciones numéricas han sido ampliamente usadas para resolver fenómenos hidrodinámicos complejos en la última década. Existen numerosas investigaciones en la literatura acerca de simulaciones numéricas del resalto hidráulico (Ma et al., 2011; Fatemeh et al., 2013; Chen et al., 2010; González and Bombardelli, 2005).

En el caso particular del resalto hidráulico sumergido, a pesar de que algunos investigadores han estudiado el flujo interno (ej. Long et al., 1990) muchas variables turbulentas importantes todavía no han sido caracterizadas en su justa medida (ej. la energía cinética turbulenta). En cuanto a las simulaciones numéricas de este tipo de fenómenos se han realizado únicamente estudios bidimensionales (Javan and Eghbalzadeh, 2012; Long, et al., 1991), sin tener en cuenta la naturaleza tridimensional de este tipo de escurrimientos.

Este trabajo se centra en el estudio del resalto sumergido generado aguas abajo de una compuerta plana. En la Figura 1 se muestra el esquema típico de este fenómeno donde se puede apreciar el rol principal de eje horizontal y los dos vórtices secundarios de eje vertical cercanos a la compuerta.

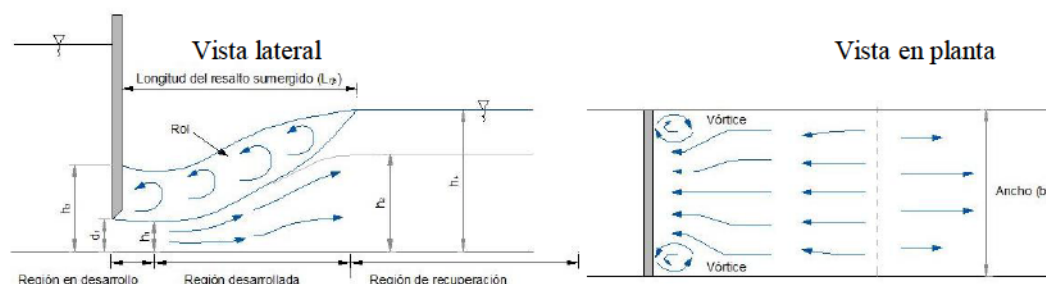


Figura 1: Resalto hidráulico sumergido aguas abajo de una compuerta (Long et al., 1990)

Uno de los objetivos de esta investigación es aportar al conocimiento del flujo turbulento del resalto sumergido a partir de mediciones experimentales de velocidad, analizando la influencia de la sumergencia y el número de Froude en los fenómenos turbulentos. Por otro lado, se pretende evaluar el grado de aproximación que es posible obtener con simulaciones numéricas de diferentes características en dos y tres dimensiones en un flujo altamente turbulento y tridimensional.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los ensayos fueron desarrollados en un canal rectangular de acrílico de 0.6 m de ancho (b), 0.6 m de alto y 12 m de largo ubicado en las instalaciones de la Universidad Nacional de La Plata. Para generar el resalto sumergido se empleó una compuerta plana con labio inferior afilado, garantizando la contracción completa del flujo al ingreso del resalto. Como dispositivo de aforo se utilizó un vertedero triangular y los niveles de restitución fueron controlados a partir de una compuerta variable.

Los experimentos incluyen números de Froude de ingreso (F) de 3, 4 y 5 y factores de sumergencia (S) desde 0.18 hasta 1.04.

Las condiciones experimentales ensayadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones experimentales

Test	$d_1^{(1)}$ [cm]	$h_1^{(2)}$ [cm]	$U_1^{(3)}$ [m/s]	$h_4^{(4)}$ [cm]	$F^{(5)}$	$S^{(6)}$	$Re_1^{(7)}$
T ₁	3.7	2.3	2.35	17.5	5.00	0.18	53046
T ₂	3.7	2.3	2.34	23.8	4.98	0.61	52851
T ₃	3.7	2.3	2.36	30.4	5.02	1.04	53272
T ₄	5.0	3.1	2.19	19.0	4.00	0.20	66684
T ₅	6.0	3.7	1.79	17.1	3.00	0.24	65659

⁽¹⁾ d_1 : apertura de la compuerta

⁽²⁾ h_1 : sección contraída, $h_1 = 0.611 \cdot d_1$

⁽³⁾ U_1 : velocidad de ingreso al resalto

⁽⁴⁾ h_4 : tirante aguas abajo del resalto

⁽⁵⁾ F : Froude de ingreso, $F = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}$

⁽⁶⁾ S : sumergencia, $S = \frac{h_1 - h_2}{h_4}$ donde h_2 es el tirante conjugado subcrítico del resalto libre

⁽⁷⁾ Re_1 : Reynolds de ingreso, $Re_1 = \frac{\rho U_1 h_1}{\mu}$

Instrumento de medición y procesamiento de la señales de velocidad: Los datos experimentales fueron registrados a partir de un velocímetro Vectrino Plus (Nortek®), el cuál utiliza el efecto Doppler para medir la velocidad del agua. La frecuencia interna de medición del instrumento es de 10 MHz, mientras que la frecuencia de adquisición usada durante los ensayos corresponde a 50 Hz. El volumen de muestreo empleado fue un cilindro de 6 mm de diámetro y 7 mm de alto. La longitud de registro fue de 300 s por cada punto de medición, alcanzando un total de 15.000 datos por punto.

La metodología utilizada en este trabajo para computar los parámetros turbulentos está basada en el código numérico desarrollado por García et al. (2005) y tiene en cuenta la corrección por error Doppler y los efectos de la estrategia de adquisición de datos. Aunque la incorporación de aire se puede considerar despreciable debido a la sumergencia, la elevada turbulencia origina algunos valores anómalos en la señal (*spikes*). Para remover estos valores anómalos se utilizó el filtro Phase-Space Thresholding Method (PSTM) (Goring and Nikora, 2002; modificado por Wahl, 2003) el cual está disponible en el software WinADV32-Version 2.030.

III. MODELO MATEMÁTICO Y CÓDIGO NUMÉRICO

Ecuaciones gobernantes: Dos aproximaciones fueron usadas para predecir el flujo turbulento en las simulaciones del resalto hidráulico. La primera de ellas corresponde a las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas (RANS) utilizando como cierre de turbulencia el

modelo RNG $k-\varepsilon$ (Yakhot and Orszag, 1986). La segunda fue el modelo de Simulación de los Grandes Vórtices (LES) (Smagorinsky, 1963)

Condiciones de borde: La superficie libre constituye una condición de borde interna dinámica, y su localización debe ser considerada en cada paso de tiempo. Para este propósito se implementó el método Volumen de Fluido (Volume of Fluid, VOF) en su versión original, el cual está incorporado en el código FLOW-3D[®] (ver Hirt and Nichols, 1981).

Además de la condición dinámica de la superficie libre, se incluyeron condiciones de borde de presión aguas arriba y aguas abajo de la compuerta en correspondencia con los niveles líquidos de cada ensayo. Asimismo se impuso como condición de borde adicional, velocidad normal nula sobre la compuerta, el fondo y las paredes laterales del canal (en el caso de las simulaciones tridimensionales) y la "función de pared" fue implementada para tener en cuenta los estadísticos turbulentos en estas zonas (Ferziger and Peric, 2002).

Características principales del código numérico: En este trabajo utilizamos el código comercial FLOW-3D[®], el cual es un software de mecánica de fluidos de propósito general. Las ecuaciones gobernantes presentadas anteriormente son resueltas por el método de volúmenes finitos/diferencias finitas en una malla estructurada. Para la representación de obstáculos el código utiliza el método FAVOR (deriva de las siglas inglesas *FractionalArea/VolumeObstacleRepresentation*)

El dominio computacional puede ser representado por múltiples bloques de malla. A efectos de reducir el requerimiento de memoria y el costo computacional es posible linkear o anidar mallas con el objeto de representar diferentes escalas del fenómeno en estudio.

Implementación del código numérico: Como fue mencionado previamente las ecuaciones empleadas en la solución del flujo turbulento fueron las RANS y LES. Se simularon dos de los escenarios estudiados experimentalmente: T_3 y T_5 . Asimismo, en el caso de las simulaciones RANS se emplearon aproximaciones en dos y tres dimensiones (RANS 2D y RANS 3D respectivamente). En la Tabla 2 se pueden observar las características de las simulaciones.

Tabla 2: Características principales de las simulaciones numéricas

Simulación	Escenario	Ecuaciones	2D o 3D	N° de celdas	Tamaño mínimo de celda [mm]
S ₁	T ₃ (F=5.02, S=1.04)	RANS	2D	82.767	4
S ₂	T ₃ (F=5.02, S=1.04)	RANS	3D	820.739	3
S ₃	T ₃ (F=5.02, S=1.04)	LES	3D	1.935.901	3
S ₄	T ₅ (F=3.00, S=0.24)	RANS	2D	704.548	2
S ₅	T ₅ (F=3.00, S=0.24)	LES	3D	704.548	2

Es importante destacar que las dimensiones finales de la malla utilizada en las simulaciones RANS surgen luego de efectuar el estudio de convergencia de malla correspondiente ("*thesolutionverification*"). En el caso de la simulación S₅, debido al tiempo computacional de la misma, se consideró una faja de 6 cm de ancho de canal.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Características del flujo: En la Tabla 1 se listan las condiciones de flujo ensayadas con la nomenclatura T_1 a T_5 . Las características del flujo analizadas incluyen componentes de la velocidad media, tensiones de corte turbulentas ($-\overline{u'w'}$) y energía cinética turbulenta (TKE).

La Figura 3 presenta las velocidades en la dirección del flujo (u) para el ensayo T_3 . Las componentes de velocidad son adimensionalizadas con la velocidad de ingreso al resalto U_1 , mientras que la distancia longitudinal y vertical (x, z) están referidas a la sección

contraída (h_1). La línea punteada roja corresponde a la velocidad cero, que representa el límite de la zona de recirculación ("roller")

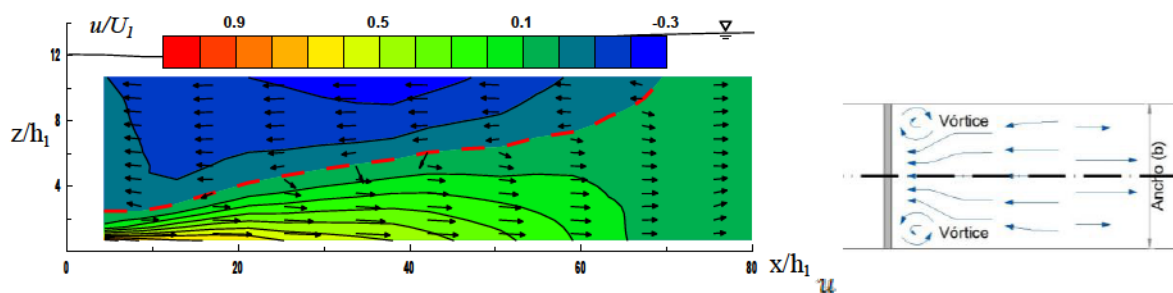


Figura 3: Distribución de velocidades longitudinales $\frac{u}{U_1}$ en el plano central

La distribución de la energía cinética turbulenta (**TKE**) es presentada en la Figura 4. Las magnitudes de *TKE* se expresan en función del cuadrado de la velocidad de ingreso (U_1^2). En la zona central del canal ($y/w= 0.5$) la *TKE* alcanza un máximo en la progresiva $x/h_1= 17$ aproximadamente, para luego propagarse hacia aguas abajo.

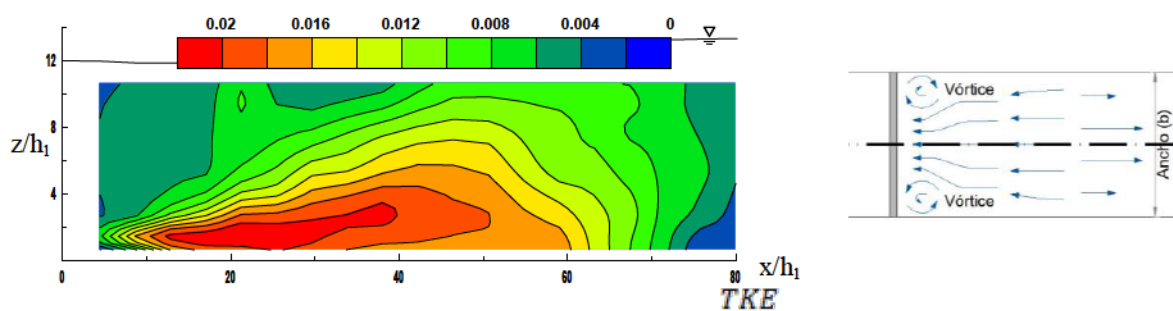
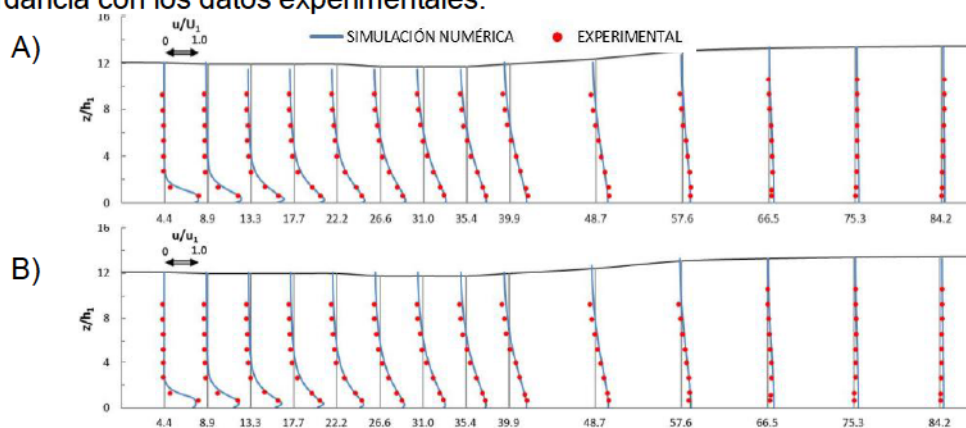


Figura 4: Distribución de la energía cinética turbulenta ($\frac{TKE}{U_1^2}$) a lo largo del plano central

V. COMPARACIÓN SIMULACIÓN NUMÉRICA Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Flujo medio: En la Figura 5 se presenta la comparación entre la componente de la velocidad media longitudinal (*u*) medidas en forma experimental y las obtenidas en las diferentes simulaciones numéricas para la condición $F=5.02$, $S=1.04$. Es posible observar que todas las simulaciones realizadas (RANS 2D, RANS 3D, LES) muestran una muy buena concordancia con los datos experimentales.



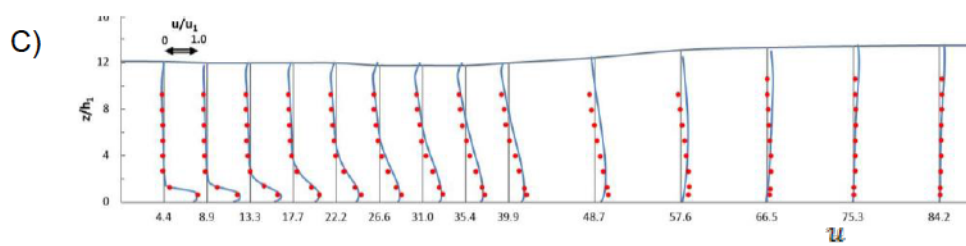


Figura 5: Comparación de la distribución longitudinal de la velocidad \overline{U}_1 en el plano $y/b=0.5$: A) RANS 2D; B) RANS 3D; C) LES

Estadísticos turbulentos: La Figura 6 muestra en forma comparativa los resultados experimentales y los obtenidos a partir de las simulaciones numéricas de la distribución de $\frac{TKE_{max}}{U_1^2}$ en función de $\frac{x}{h_1}$, siendo TKE_{max} la máxima energía cinética turbulenta en cada sección vertical.

En el caso de las simulaciones RANS (2D y 3D) existe un buen acuerdo con los datos experimentales en la zona de recuperación del resalto sumergido, es decir, más allá de la progresiva $x/h_1=55$ y $x/h_1=17$ para la Figura 8A y la Figura 8B respectivamente. En la zona de desarrollo del resalto sumergido, donde la turbulencia es mayor y los fenómenos tridimensionales están presentes, las simulaciones RANS se apartan de los datos medidos. En lo que respecta a la simulación LES hay un mejor ajuste en la zona de mayor turbulencia como se aprecia en la Figura 8B. Sin embargo aparece una subestimación de TKE en la zona de recuperación.

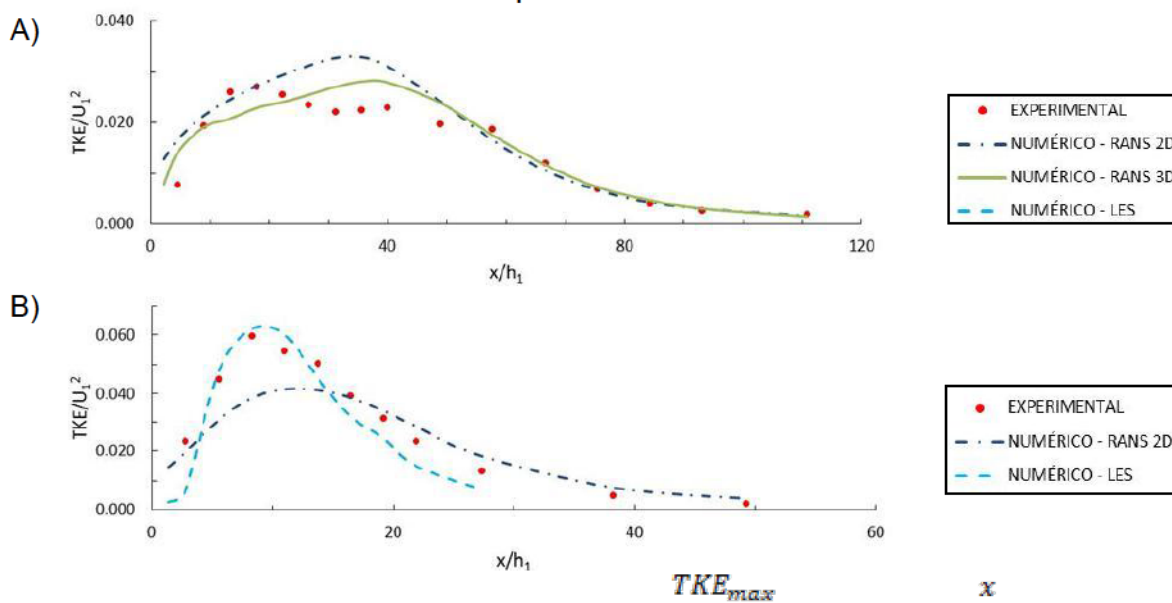


Figura 6: Comparación de la distribución longitudinal $\frac{TKE_{max}}{U_1^2}$ en función de $\frac{x}{h_1}$ en el plano $y/b=0.5$: A) $F=5.02$, $S=1.04$; B) $F=3.0$, $S=0.24$

VI. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

A partir de este nuevo set de datos experimentales es posible conocer algunos parámetros turbulentos, tales como la energía cinética turbulenta (TKE), del resalto sumergido de los que no se tenía mayor conocimiento en la bibliografía. Los perfiles de velocidad media y de tensiones de corte turbulentas que surgen de estos nuevos ensayos se ajustan a los perfiles adimensionales típicos del resalto sumergido.

En relación a las simulaciones numéricas podemos concluir:

- Todas las simulaciones realizadas (RANS 2D, RANS 3D, LES) muestran una muy buena concordancia con los datos experimentales de velocidad media.

- En cuanto a la energía cinética turbulenta (*TKE*), los valores obtenidos a partir de las simulaciones RANS (2D y 3D) presentan un buen acuerdo con los datos experimentales en la zona de recuperación del resalto sumergido. Sin embargo en la zona de desarrollo del resalto, las simulaciones RANS se apartan de los datos medidos. En esta zona de mayor turbulencia la simulación LES presenta un mejor ajuste con los datos experimentales.

REFERENCIAS

- Chen, J., Zhang, J., Xu, W. and Wang, Y. (2010). Numerical simulation of the energy dissipation characteristics in stilling basin of multi-horizontal submerged jets. *Journal of hydrodynamics*, 22(5), 732-741.
- Dey, S. and Sarkar, A. (2008). Characteristic of turbulent flow in submerged jumps on rough beds. *Journal of Engineering Mechanics*, 134, 49-59.
- Fatemeh, R., Mahdi, S., Md Azlin, M.S. and Saeed, R.S.Y. (2013). Numerical simulation of undular hydraulic jump on smooth bed using volume of fluid method. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 1514–1522.
- Ferziger, J. H., and Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- García, C. M. (2005). *Tudecode - a matlab program to compute turbulence parameters*. Urbana-Champaign: Tech. rep., University of Illinois.
- García, C. M., Cantero, M., Niño, Y., and García, M. H. (2005). Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 1062-1073.
- González, A., and Bombardelli, F.A. (2005). Two-phase-flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. Seoul: in Proc. XXXI IAHR Congress.
- Goring, D., and Nikora, V. (2002). Despiking acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 117-126.
- Hirt, C. W., and Nichols. (1981). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Javan, M. and Eghbalzadeh, A. (2013). 2D numerical simulation of submerged hydraulic jumps. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 6661-6669.
- Lennon, J. and Hill, D. (2006). Particle image velocity measurements of undular and hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 1283-1294.
- Lin, C., Hsieh, S., Lin, I., Chang, K., and Raikar, R. (2012). Laboratory Measurements of a Steady Breaker Using PIV and BIV. *Coastal Engineering*.
- Liu, M., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2004). Turbulence structure in hydraulic jumps of low froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 511-520.
- Long, D., Steffler, P. M., and Rajaratnam, N. (1990). LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 39(5), 437-460.
- Long, D., Steffler, P. M., and Rajaratnam, N. (1991). A numerical study of submerged hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 29(3), 293-308.
- Ma, J., Oberai, A.A., Lahey Jr., R. T. and Drew, D.A. (2011). Modeling air entrainment and transport in a hydraulic jump using two-fluid RANS and DES turbulence models. *Heat Mass Transfer*, 47, 911–919.
- Misra, S. K., Kirby, J. T., Brocchini, M., Veron, F., Thomas, M. and Kambhamettu, C. (2008). The mean and turbulent flow structure of a weak hydraulic jump. *Physics of Fluids*, 20, 035106.
- Rajaratnam, N. (1965). Submerged hydraulic jump. *Journal of the Hydraulic Division*, 91(HY3).
- Resch, F. J., and Leutheusser, H. J. (1972a). Mesures des tensions de reynolds dans le ressaut hydraulique. *Journal of Hydraulic Research*, 10, 409-429.
- Rouse, H., Siao, T. and Nagaratnam, S. (1958). Turbulence characteristics of the hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division*, 84, 1528-1-30.

- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations. *Mon. Weather Rev.*, 91, 99-164.
- Svendsen, I., Veeramony, J., Bakunin, J. and Kirby, T. (2000). The flow in weak turbulent hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, 418, 25-57.
- Yakhot, V., and Orszag, S. A. (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory. *J. of Scientific Computing*, 1 (1), 3-51.
- Wu, S. and Rajaratnam N. (1995). Effect of baffles on submerged flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 644-652.
- Zare, H. K. and Baddour, R. E. (2007). Three-dimensional study of spatial submerged hydraulic jump. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 1140-1148.