

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SALTO HIDRÁULICO LIBRE PARA DETECTAR FORMACIÓN DE VÓRTICES EN LA ZONA DE ALTA TURBULENCIA

José Gpe. Pinto S.¹, Moises Nazar B.¹
José A. Figueroa G.¹, Oscar González O.²

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados experimentales del salto hidráulico libre en un canal rectangular, haciendo énfasis en la búsqueda de patrones de tipo geométrico en la zona donde se observa la mayor turbulencia. El análisis experimental se ha propuesto inicialmente al delimitar la zona de transición mediante dos volúmenes de control que permiten considerar detalles como el movimiento de vórtices en el remolino y el caudal de recirculación. De las observaciones se asume que ambos volúmenes de control no intercambian masa, pero si existe un intercambio de energía y momento debido a las fuerzas cortantes en la interface entre ambos volúmenes.

Palabras clave: Salto hidráulico, turbulencia, remolino, vórtices.

ABSTRACT

In this paper we present the experimental results of the free hydraulic jump in a rectangular channel, emphasizing the search for patterns of geometric type in the area where the greatest turbulence is observed.

The experimental analysis was initially proposed by delimiting the transition zone through two control volumes that allow to consider details such as the movement of vortices in the swirl and the flow of recirculation. From the observations it is assumed that both control volumes do not exchange mass, but if there is an energy and momentum exchange due to the shear forces at the interface between both volumes.

Keywords: Hydraulic jump, turbulence, swirl, vortices.

INTRODUCCIÓN

La transición repentina del flujo supercrítico a subcrítico, se conoce como salto o resalto hidráulico, es un fenómeno que a pesar de ser estudiado durante muchos años, aún presenta aspectos que requieren mayores consideraciones, tales como: la longitud del salto y la determinación de los tirantes alternos, mismos que aún no tienen una formulación definitiva para los diseñadores de estructuras hidráulicas, debido principalmente a las consideraciones y simplificaciones que se hacen en cada estudio. El fenómeno del resalto hidráulico ya había sido observado por Leonardo Davinci, sin embargo en 1819 Bidone realizó una serie de experimentos que fueron analizados teóricamente por Bélanger en 1828; Darcy y Bazin también realizaron una serie de experimentos en 1865, Boussinesq en 1877 propuso las soluciones que llevan su nombre. Con la implementación de nuevas tecnologías se han tenido importantes aportaciones como las de Bakhmeteff en 1932 y recientemente se han hecho revisiones técnicas con el uso de modelos numéricos más sofisticados que abarcan desde Hager (1992), Chanson (2009) y Schulz, et al (2015).

¹Profesor-investigador, Facultad de Ingeniería- Universidad Autónoma de Chiapas. Email: polito_hernandez@hotmail.com.

²Estudiante de la Especialidad en Didáctica de las Matemáticas de la Facultad de Ingeniería- UNACH. Email: greysi_0226@hotmail.com

DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ha delimitado a un área donde se observa una intensa turbulencia junto con la aparición de un flujo bifásico. En dicha zona, la profundidad del flujo, los campos de velocidad, las distribuciones de presiones, la longitud del remolino y la longitud del salto hidráulico, presentan una notable dificultad al intentar cuantificarlos independientemente de las condiciones experimentales del fenómeno, siempre que se trate de un resalto hidráulico fuerte. Como etapa inicial, se ha propuesto estudiar experimentalmente la formación de patrones de flujo en la zona altamente turbulenta en un canal rectangular de acrílico cuando se cambia el régimen de flujo para distintos valores del números de Froude comprendidos entre 3 y 6.

La fase experimental se lleva a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y para ello se ha automatizado el canal con un osciloscopio de dos bandas de alta precisión, sensores ultrasónicos, lámparas estroboscópicas y cámara de alta definición que permiten detener las imágenes a escalas en tiempos muy pequeños para evaluar comparativamente los datos experimentales con datos teóricos reportados en la literatura. La metodología empleada es la propuesta por Nóbrega y Schulz (2013), y Nóbrega (2014), quienes recomiendan medir la intensidad de la turbulencia vertical y los correspondientes números de Strouhal en cada posición medida. Sugieren además que para determinar la longitud del salto se use el decaimiento en la intensidad de la turbulencia vertical en la superficie libre.

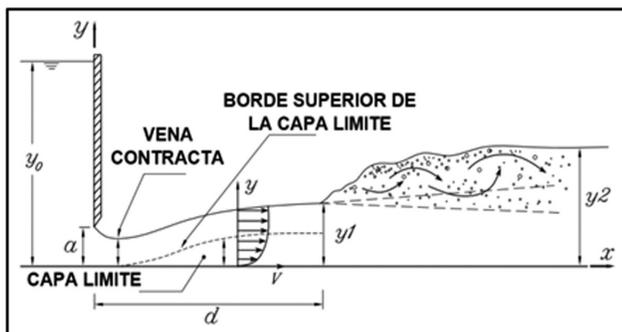


Figura 1. Salto hidráulico

CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS

La figura 1, muestra un resalto hidráulico clásico formado aguas abajo de una compuerta plana. Sobre la longitud del salto la profundidad del flujo cambia de supercrítico y_1 a subcrítico y_2 . El par de tirantes alternos están relacionados con la ecuación de Bélanger:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (1)$$

En donde

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (2)$$

es el número de Froude en la sección 1, g es la aceleración debida a la gravedad $v_1 = q/y_1$, es la velocidad promedio en términos de la descarga por unidad de ancho q .

En el caso experimental se hace uso de una compuerta plana en donde el flujo volumétrico se determina con la ecuación:

$$q = C_d \sqrt{2gy_0} \quad (3)$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga y para lo cual se ha tomado la ecuación propuesta por Ohtsu et al (1991).

$$C_d = 0.71 - 0.85 \left(\frac{y_0}{a} \right) \quad (4)$$

Con buenos resultados reportados por Leutheuser, et al, (2010) para la condición $3.0 < F_1 < 9.5$, a , es la abertura de la compuerta.

Al aplicar la ecuación de la energía

$$P + y_0 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} (1 + K) \quad (5)$$

Donde

$$K = \frac{\Delta E_p}{q^2/2gy_1^2} \quad (6)$$

Es un coeficiente empírico de pérdida que involucra la energía disipada en el salto: $\Delta E_p = (P + y_0) - (y_1 + q^2 / (2gy_1^2))$

Al sustituir (3) en (5) se tiene:

$$\left(\frac{y_1}{y_0}\right)^2 - \left(1 + \frac{P}{y_0}\right)\left(\frac{y_1}{y_0}\right) + \frac{4}{9}C_d^2(1+K) = 0 \quad (7)$$

Al considerar el número de Froude F_1 en la ecuación (7) resulta

$$1 - \left\{ \left(\frac{9}{4C_d^2} \right) \frac{1}{2} F_1^2 \right\}^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{P}{y_0} \right) + \frac{1}{2} F_1^2 (1 + K) = 0 \quad (8)$$

Ecuación experimental con las variables características del salto hidráulico realizadas en laboratorio.

EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Con el fin de determinar cuantitativamente las observaciones, se realizaron una serie de estudios del salto hidráulico que ocurren aguas abajo de un vertedor rectangular. Los experimentos se realizaron en un canal horizontal de acrílico con pendiente variable, con un ancho de 7.6 cm, una profundidad de 25 cm y una longitud de 4.87 m. Los resultados reportados fueron hechos con una descarga constante de 3 l/s en toda la investigación. La única variable independiente fue la abertura de la compuerta. Para visualizar los efectos y trayectorias del flujo se utilizaron dos lámparas de luz ultravioleta para resaltar la nube de burbujas de agua y los vórtices que se producen en la turbulencia; aguas arriba del flujo se usó tinta fluorescente como medio de contraste para distinguir distintas trayectorias del flujo.

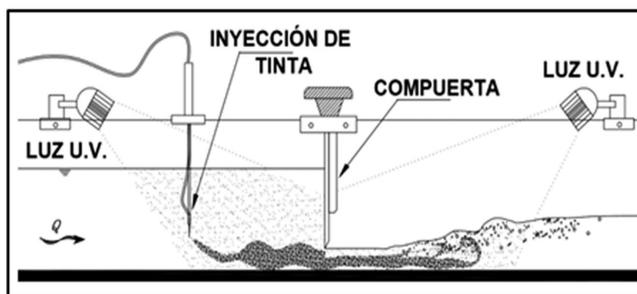


Figura 2. Configuración del experimento

Al observar el flujo con un gasto constante se obtuvieron series de fotografías y videos los cuales se analizaron en cámara lenta mediante el uso de un editor de imágenes que permite observar los detalles de las líneas o patrones de flujo que se forman durante el fenómeno en estudio.

EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL SALTO HIDRÁULICO

Cuando el resalto no es rechazado por la vena contraída del orificio de la compuerta, se produce un resalto completo desde la sección de ella hacia aguas abajo; misma que se forma después de la vena contraída hacia la región donde comienza a formarse el remolino debido a las fuerzas impulsivas y a la interacción de dos corrientes de flujo con condiciones muy distintas, esto se evidencia experimentalmente en la secuencia de imágenes representadas en la figura 3, las zonas representadas con puntos en el primer volumen de control indican la propagación de centros de vórtices y su evolución a lo largo del volumen de control, estos se desvanecen al atravesar la interface que separa ambos volúmenes, mientras que los puntos en el segundo volumen de control representan las trayectorias de las burbujas que se originan en los vórtices y que por diferencias de presión tienden a ascender a la superficie libre.

RESULTADOS

De un análisis exhaustivo de las imágenes, puede observarse que las turbulencias están directamente relacionadas con la geometría y velocidad media del flujo y se expresan en forma de grandes y claramente reconocibles estructuras comúnmente denominadas "vórtices" que es una característica principal de la turbulencia. En la figura (4) se muestra un esquema en el cual existen dos zonas de recirculación donde se ven con claridad estos efectos.

En flujos con burbujas, estas estructuras son un factor importante cuando se desea analizar el arrastre de las mismas; varios autores han abordado este tema: Heller et al. (2005). En un estudio numérico, Pagliara (2006) descubrió que en los flujos turbulentos, las burbujas se organizan entre si formando grandes agrupaciones (como estructuras) que tienen su eje longitudinal en la dirección de la velocidad media del flujo.

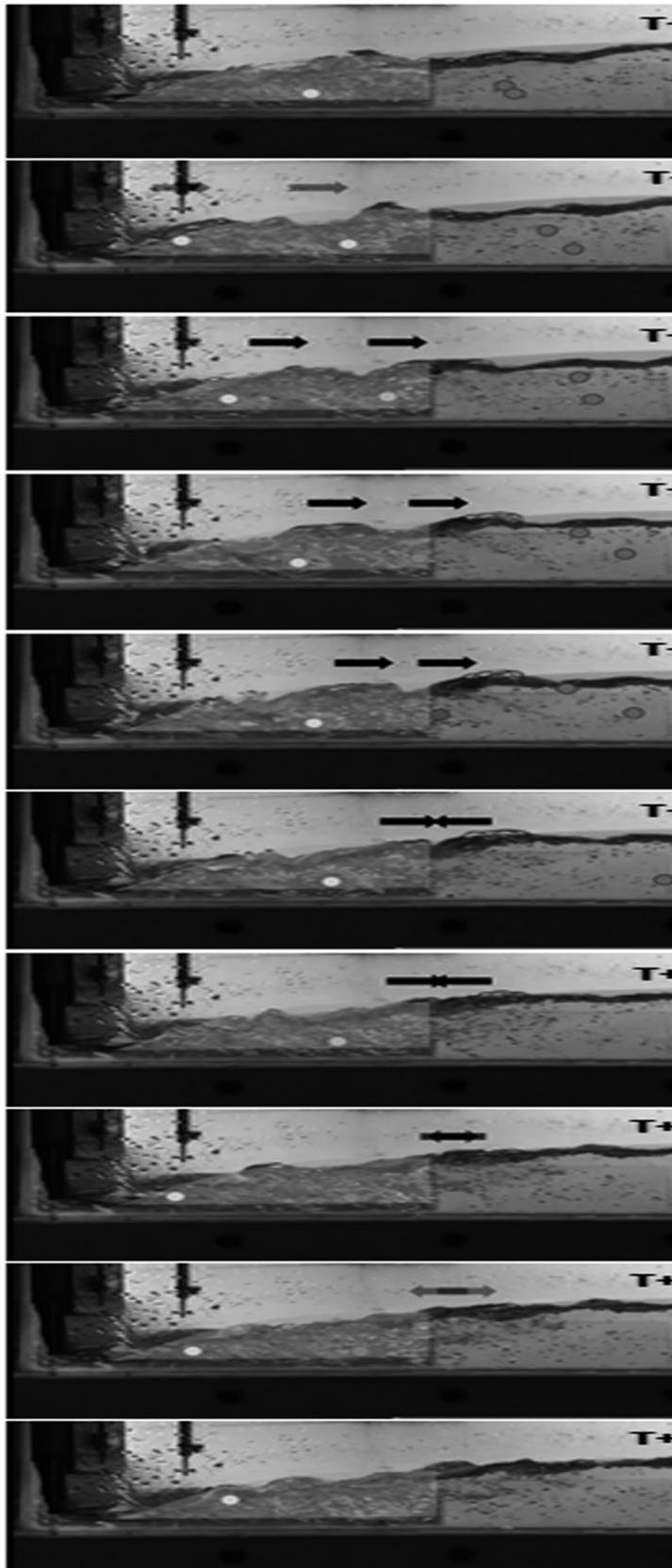


Figura 3. Secuencia de imágenes capturadas con un intervalo de 0.20 segundos.

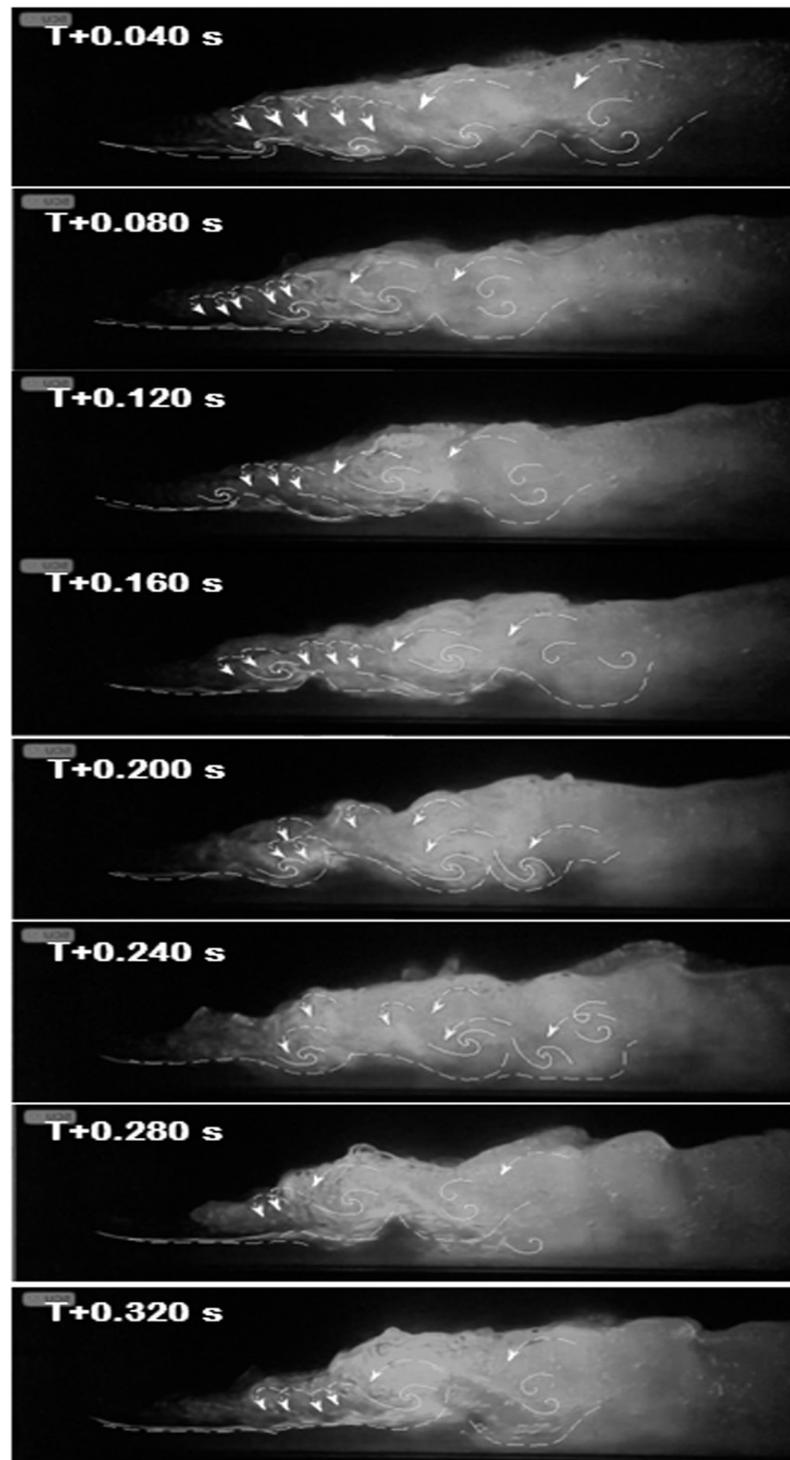


Figura 5. Secuencia de imágenes capturadas a intervalos de 0.040 segundos.

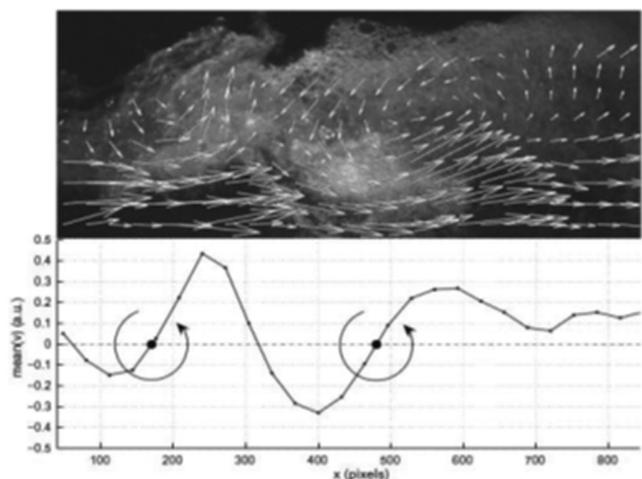


Fig.4. Visualización de los vórtices

La evolución del salto depende en gran medida de y_0 . Al analizar meticulosamente las series de imágenes a intervalos muy pequeños, se logran obtener patrones geométricos característicos de las dos regiones de estudio plenamente identificadas, como se observa en la figura 4 y en la figura 5.

La formación aparentemente desordenada y compleja en la turbulencia del salto hidráulico, es una muestra de la huella dactilar de la naturaleza y de la forma como a nivel de átomos se ha formulado la estructura del mundo, a través de figuras o formas geométricas que obedecen a códigos que tienen formulaciones matemáticas que se ajustan a leyes con saltos cuánticos bien definidos (Mandelbrot, 1983). En la figura 5 se distingue al inicio del salto, una zona bien definida de vórtices continuos que son repetitivos al analizarse a mayor extensión temporal. En el borde superior de la zona definida como capa límite se marcan flujos de formas cóncavas y convexas que son independientes de los regímenes de flujo. Lo anterior es evidencia que se forman patrones de flujo bien definidos.

CONCLUSIONES

En flujos burbujeantes de régimen turbulento como el resalto hidráulico, se forman agrupaciones de burbujas cuya escala típica de tiempos se encuentra después de la escala de tiempo de la burbuja principal, indicando la presencia de vórtices o agrupaciones de burbujas que finalmente incurren en la formación de

un patrón de flujo típico para cada régimen de flujo específico. Las ondas de choque comienzan en una región de flujo supercrítico y se cruzan en la primera cresta de onda, esta se incrementa a medida que se estabiliza el flujo, algo similar puede observarse con los perfiles de superficie libre, al hacer variar la descarga a través de la compuerta. Sin el uso de técnicas modernas de medición sería complejo caracterizar este tipo de fenómenos. Queda aún por estudiarse la propagación de las burbujas, sus velocidades y la evolución de vórtices en la interfaz aire-agua en la superficie libre del resalto.

REFERENCIAS

- Bakhmeteff, B.A. (1932). "Hydraulics of Open Channels." McGraw-Hill, New York, USA, 1st ed., 329 pages.
- Bélanger, J. B. (1828). "Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes". Essay on the numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilian-Goeury, Paris.
- Bélanger, J. B. (1849). "Notes sur le cours d hydraulique Notes on a course in hydraulics." Mém. Ecole Nat. Ponts et Chaussées, session 1849–1850, 222 pages in French. Paris, France.
- Bélanger, J.B. (1841). "Notes sur l'hydraulique Notes on hydraulic engineering." Ecole Royale des Ponts et Chaussées, session 1841–1842, 223 pages in French. Paris, France.
- Bidone, G. (1819). "Le remou et sur la propagation des ondes". The jump and on wave propagation, Report to Académie Royale des Sciences de Turin, séance 12 Dec., Vol. XXV, 21–112 & 4.
- Boussinesq, J.V. (1877). "Essai sur la Theorie des Eaux Courantes." Memoires presentes par divers savants l'Academie des Sciences, Vol. 23, Serie 3, No. 1, supplement 24, pp. 1-680 (in French). Paris, France.
- Darcy, H.P.G. (1858). "Recherches Experimentales relatives aux Mouvements de l'Eau dans les Tuyaux." (Experimental Research on the Motion of Water in Pipes.) Memoires Presentes l'Academie des Sciences de l'Institut de France, Vol. 14, p. 141 (in French). Paris, France.
- Hager, W.H., Bremen, R., Kawagoshi, N. (1992). "Classical hydraulic jump: length of roller". Journal of Hydraulic Research; 28 591-608.
- Heller, V., Hager, W.H., and Minor, H. (2005). "Sky jump hydraulics". J. Hydraulic. Eng., 131(5), 347-355.
- Leutheusser, H.J., and Fan, J.J. (2010). "Transcritical weir flow" Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), 75 (SI), S343-S344.
- Mandelbrot, B. (1983). "The fractal geometry of nature" W. H. Freeman and Co., United States.
- Nóbrega J.D., Schulz H.E., Simões ALA, Porto, R.M. (2013). "Measurement of turbulence parameters in hydraulic jumps using ultrasonic sensors and their correlation with macroscopic flow parameters". In: COBEM 2013: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 3-7, Ribeirão Preto, Brazil.
- Nóbrega JD, Schulz HE, Zhu DZ. (2014). "Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurements." In: Chanson H, Toombes L. (eds.) Hydraulic Structures and Society - Engineering Challenges and Extremes: proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS2014, 25-27, Brisbane, Australia.
- Nóbrega, J.D. (2014). "Metodologia teórica e experimental para determinação das características do ressalto hidráulico clássico". MSc Thesis. Universidad of Sao Paulo; 2014. Sao Paulo, Brazil.
- Otsu, I., Yasuda, Y (1991) "transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop". Journal of hydraulic research. Vol 29. No.3. pp 309-328.
- Pagliara, S., Hager, W.H., and Minor H.E (2006). "Hydraulics of plunge pools". J. Hydraulic. Eng., 132(5), 450-461.
- Schulz, H.E., Lopes-Júnior, G.B., Simões ALA, Lobosco, R.J. (2015). "One dimensional turbulent transfer using random square waves - scalar/velocity and velocity/velocity interactions". In: Schulz HE, Simões ALA, Lobosco RJ. (eds.) Hydrodynamics– Advanced Topics. 1 ed. InTech; p3-34.