

INVESTIGACIÓN SOBRE RESALTOS HIDRÁULICOS: SIMULACIÓN NUMÉRICA Y CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS DIFERENTES REGIMENES DE FLUJO

[*] Jannes Eckart, [**] Jesús Manuel Fernández Oro
[*] Alumno; [**] Tutor(es)
UO228144@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Los resaltos hidráulicos son fenómenos de gran relevancia en el estudio de la Dinámica de Fluidos; en particular en el campo del flujo en canales. Además, tienen uso en muchas aplicaciones técnicas por su alta disipación de energía, e incluso es habitual encontrarlos en un buen número de flujos naturales.

Este estudio se centra en el análisis de flujos con números de Froude (indicador de la velocidad bajo unas dimensiones geométricas dadas) moderados e investiga, de forma experimental y numérica, el desarrollo y las características principales de resaltos hidráulicos iniciados a través de un escalón. Para completar el trabajo, también se han analizado brevemente las situaciones más extremas, con resaltos en condiciones de Froude tanto muy altas como muy bajas.

Para el estudio numérico se emplea el código comercial ANSYS FLUENT® en su formulación bidimensional. Además, la solución se ha completado de forma no estacionaria utilizando el algoritmo VOF para discretizar la interfase entre agua y aire del modelo bifásico considerado.

Se han comparado los diferentes resultados del estudio con datos de trabajos anteriores. Se ha observado un acuerdo muy bueno entre esos datos de referencia y la simulación numérica aquí realizada, en particular para el régimen de números de Froude moderados. También la contrastación experimental a través de la visualización del resalto en un canal hidrodinámico

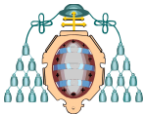
ha proporcionado un acuerdo cualitativo razonable, aunque no se ha encontrado una gran exactitud en los valores medidos. El escalón inicia perfectamente la formación de todos los saltos excepto aquellos que corresponden con flujos a velocidades más altas cuando el canal simulado está vacío.

ABSTRACT

Hydraulic jumps are an important phenomenon in the area of open channel flow in fluid dynamics. They frequently appear in both nature and technology and serve as excellent energy dissipaters. In this paper, hydraulic jumps have been investigated both experimental and numerically, especially regarding the ability of a ground step to set off and develop different jump conditions dependent on the flow Froude number. Main investigation was performed for jumps with moderate Froude numbers. Ground steps, especially if combined with inertia forces of an already water-filled channel, have proven to serve as excellent jump initiators. Overall results coincide rather well with the expectations of previous studies in the literature.

INTRODUCCIÓN

Motivación. Los saltos hidráulicos aparecen tanto en la naturaleza, por ejemplo en ríos y afluentes, como en la técnica. Incluso ocurren en la vida



diaria, cuando al abrir el grifo, el agua choca contra el lavabo. Por su muy alta turbulencia resultan ser procesos de mezcla muy eficiente y disipación energética muy alta. La investigación de saltos hidráulicos ya ha proporcionado un conocimiento considerable en relación a porcentajes de disipación, mezcla y las fuerzas o tensiones aplicadas en los canales.

El mayor uso de los saltos es la disipación de energía, tal y como se aplica en diques y estructuras de generación hidroeléctrica: Por ejemplo se realizó un estudio sobre la efectividad y el impacto en las cuencas de los canales de disipación del dique Vatnsfell en Islandia (Margeirsson 2007).

Además es un fenómeno interesante para la ingeniería marina, en la que las olas que rompen en la playa se comportan de forma muy similar a un salto hidráulico; en particular si se usa un sistema de coordenadas móvil (Hibberd y Peregrine 1977, Peregrine y Svendsen 1978).

También tiene aplicaciones para mezclar sustancias químicas. Especialmente, reacciones lentas que necesitan superficies grandes de contacto entre las sustancias. En estas condiciones se pueden acelerar usando saltos hidráulicos. Del mismo modo, se puede aplicar el salto para mezclar un líquido con otras sustancias, como en el caso de enriquecer agua con aire. Otros usos menos comunes son, por ejemplo, cambiar las alturas de un flujo o aplicar fuerzas (Hager 2010).

Teoría unidimensional. El (re-)salto hidráulico (Figura 1) es un fenómeno de la Mecánica de Fluidos, que ocurre cuando el flujo en un canal evoluciona de flujo supercrítico a flujo subcrítico (Chanson 2009).

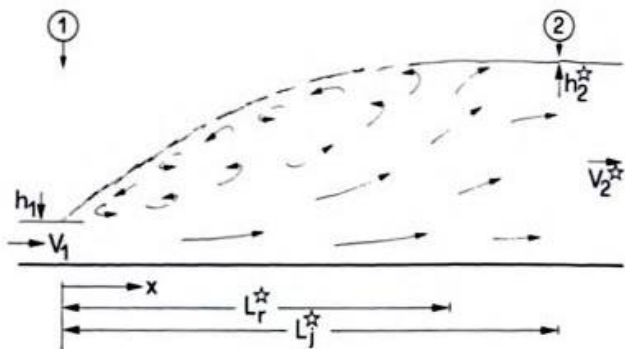


Figura 1: Esquema de un resalto hidráulico (Hager 1992)

Se explica cómo es el salto hidráulico en muchos libros de mecánica de fluidos, por ejemplo en el White (1998), sin embargo a continuación se dará una breve explicación sobre las características importantes para este trabajo:

Un flujo en canal libre significa que en la superficie del fluido hay presión atmosférica, por lo que los efectos de presión suelen ser menos importantes (Herwig 2008).

Para saltos hidráulicos el parámetro importante es el número de Froude, que es la relación entre la velocidad y los efectos de inercia expresados como la raíz de la gravedad por la altura:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

Para entender qué significa flujo subcrítico y flujo supercrítico primero se ha de definir cuál es el estado del flujo en condiciones críticas. Se define la energía específica de un flujo como:

$$E = h + \frac{q^2}{2gh^2}$$

donde \$q\$ es el caudal bidimensional, \$g\$ la gravedad y \$h\$ la altura del flujo.

Las condiciones críticas son aquellas en las que la energía del flujo es mínima. Así hay una altura crítica (en función del caudal) en la que se cumple que la energía es mínima:

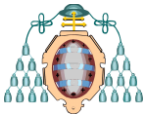
$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \quad \frac{\partial E(h_c)}{\partial h} = 0$$

Del mismo modo se puede encontrar el caudal o la velocidad crítica en función de la altura.

Además, se comprueba que en las condiciones críticas siempre el número de Froude vale 1 (\$Fr=1\$). Un flujo con \$Fr < 1\$ se llama subcrítico (que tiene velocidad baja y altura mayor) y con \$Fr > 1\$ se tiene supercrítico (que implica gran velocidad con poca altura).

Un salto hidráulico suele producirse cuando un flujo supercrítico entra en una región donde la geometría permite un número de Froude menor de 1 a presión atmosférica. Por ejemplo cuando un flujo de agua a alta velocidad se frena en un canal de grandes dimensiones.

Sabiendo el número de Froude antes del salto se puede calcular tanto la altura teórica como el número de Froude después del salto:



$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{Fr_2}{Fr_1} = \left(\frac{2}{\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Existen hasta 5 diferentes tipos de saltos hidráulicos (Figura 2), dependiendo del número de Froude antes del salto:

- Con $1.0 < Fr < 1.7$ se desarrolla un salto ondulado, que tiene turbulencia relativamente baja y presenta ondas estables. (a)
- Con $1.7 < Fr < 2.5$ se desarrolla un salto débil que concentra su turbulencia en la superficie. (b)
- Con $2.5 < Fr < 4.5$ se desarrolla un salto inestable de gran longitud y que contiene una disipación moderada. (c)
- Con $4.5 < Fr < 9$ se desarrolla un salto estable intensivo con disipación alta. (d)
- Con $Fr > 9$ se desarrolla un salto fuerte, que tiene mucha disipación y una forma irregular. (e)

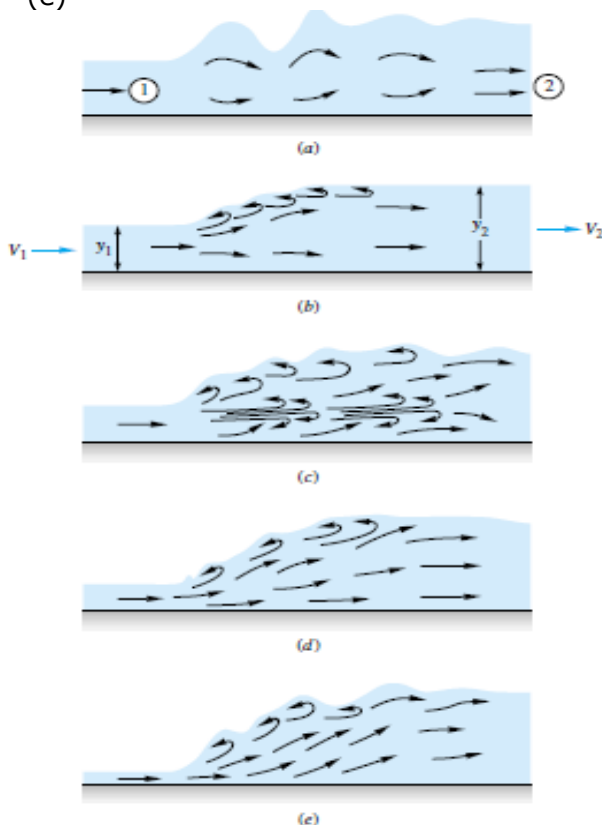


Figura 2 Esquema de los diferentes tipos de saltos hidráulicos (White 1998)

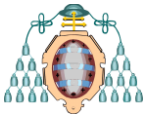
Estado del arte. El estudio de los resaltos hidráulicos presenta ya una amplia bibliografía, especialmente en el campo experimental. Las contribuciones de Bohr et al. (1997) son de los principales trabajos que describen cómo son los flujos de superficie libre y los saltos hidráulicos que pueden resultar. Se trata tanto de saltos estacionarios, que se suelen investigar en laboratorios, como de los móviles. También, Chanson (2009) presenta un compendio de conocimientos sobre los saltos hidráulicos. Otro trabajo general es el de Vischer y Hager (1995).

El primer trabajo para mostrar cómo las condiciones de entrada influyen en la disipación de la energía, en el transporte de momento y especialmente en la aireación del flujo, es el de Resch et al. (1974). Después, Chanson y Qiao (1994) realizaron un trabajo con datos experimentales sobre los saltos, centrándose de nuevo en la captura de aire.

Apoyándose en estos dos trabajos, Sabbagh-Yazdi et al. (2007) realizaron un estudio numérico tridimensional con códigos comerciales de CFD. Utilizaron el programa FLOW-3D con modelos de turbulencia tanto $k-\epsilon$ como RNG y compararon sus resultados con las conclusiones de Chanson y Brattberg (2000). Mientras cualitativamente coinciden, cuantitativamente hay diferencias, aunque no muy relevantes. Se concluye que los resultados usando el método RNG proporcionan mejor acuerdo.

Sobre los modelos de turbulencia merece destacarse el trabajo de Qun Zhao (2004). Es un estudio numérico sobre los saltos hidráulicos y la turbulencia usando el código RIPPLE. Además del modelo $k-\epsilon$ usan un modelo específico $k-l$, que divide la malla en N escalas y en el que los resultados de disipación de escala grande se refinan en la siguiente subescala. Comparando los resultados con datos experimentales obtienen buenos predicciones, aunque subestiman las velocidades horizontales. La complejidad del modelo $k-l$ todavía no parece justificar su uso, por lo que habría que emplearlo en más estudios para llegar a una conclusión final.

En el trabajo de Csaba Hös (2007) se realiza una investigación sobre los saltos hidráulicos ondulados con presencia de obstáculos en el lecho. Utilizaron el programa ANSYS CFX 10 en modo estacionario para comparar los resultados



de una simulación 2D con las formulas teóricas 1D empleando números de Froude bastante pequeños, entre 0,334 y 1,4. Encontraron que los flujos subcríticos ($Fr < 1$) coincidían muy bien. Sin embargo para caudales mayores se incrementaban las diferencias. Los casos supercríticos coinciden muy bien hasta la primera onda y cualitativamente también después, hasta un número de Froude de 1,35. A partir de ahí en la simulación ya no ocurre el salto esperado, que se justifica en el artículo por falta de ajuste en los parámetros de la simulación. Además parece lógico que un análisis estacionario no obtenga resultados muy buenos para un fenómeno cuya naturaleza presenta características no estacionarias.

El efecto de un lecho ondulado sobre los saltos hidráulicos se investiga en el trabajo de Abbaspour et al. (2009) usando CFD bidimensional. En total se hicieron 12 experimentos y simulaciones con buena coincidencia en general, aunque el modelo RNG proporcionó mejores resultados que el $k-\epsilon$. Concluyen que un lecho ondulado reduce la longitud y la altura del salto, aunque especialmente la altura.

La parte final de los saltos hidráulicos, donde el flujo muy turbulento del salto se convierte en un flujo subcrítico, fue investigado de forma experimental por Zobeyer et al. (2010) con números de Froude entre 4 y 7.

Otro trabajo relevante es el de Thiffeault y Belmonte (2010), quienes investigan de manera experimental el impacto de un chorro de líquido con inclinación sobre una placa horizontal, que resulta en un fenómeno de salto hidráulico.

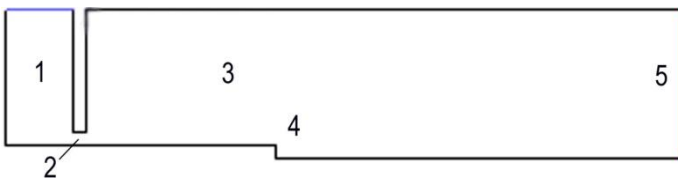


Figura 3: Esquema de la geometría

Modelo de estudio. Para el estudio de un resalto hidráulico, se ha considerado un escenario en el que se frene al flujo al sufrir un salto hidráulico (Figura 3). Se introduce una corriente de agua a través de un depósito (1), que descarga a través de un área de sección reducida (2), de manera que en el chorro resultante se produce un flujo

supercrítico. Este chorro entra hacia un canal (3) con altura suficiente para permitir flujo subcrítico. Para forzar el salto, a una determinada distancia a la descarga del chorro, se ha introducido un escalón (4) en el canal. Al final (5) del canal, con distancia suficiente para que las condiciones de contorno de salida no influyan al estudio, el agua sale del canal. El canal está bajo condiciones normales, de presión atmosférica y gravedad vertical.

El estudio se centra en el régimen de flujo supercrítico con números de Froude moderados, aunque, por extensión, también se investigan los casos supercríticos más relevantes. Se ejecuta un estudio numérico bidimensional usando ANSYS FLUENT® (Fluent 12.0, 2009) y se valida con una visualización experimental. Luego se comparan los resultados de ambos estudios con los trabajos citados en el estado del arte.

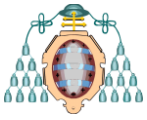
MÉTODO NÚMÉRICO

La simulación se realiza usando el código comercial de CFD ANSYS FLUENT® 12.1, en el que se utiliza un modelo bidimensional con volúmenes finitos estacionarios. Para modelizar la interfase entre los fluidos se usa el esquema VOF y se resuelve un modelo a escala 1:1 de forma no estacionaria:

- La geometría del modelo se construye mediante un mallado bidimensional por unidad de ancho, de forma que en las ecuaciones se elimina la profundidad.
- El flujo es dominado por efectos de inercia, gravedad y viscosidad. La influencia térmica es tan pequeña que se puede omitir, de manera que las ecuaciones de transferencia de calor y conservación de energía no se aplican. Por las bajas velocidades, se considera flujo incompresible.
- Para calcular el flujo se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes (Wiegardt 2006) y de continuidad (Peyret 2002):

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \eta \cdot \Delta \vec{v} + (\lambda + \eta) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{f}$$

$$\rho \cdot \nabla \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho = 0$$



- El mallado consiste en celdas estructuradas. Cada celda está fija en su forma y posición y representa un volumen de fluido. Por cada volumen y en cada iteración se aplican dichas fórmulas de resolución.
- Para simular la interfase entre el aire y agua se usa el método de volumen de fluido (VOF). Se define un escalar C , que representa la fracción de volumen de la fase de agua en cada punto. Combinando esta ecuación con el campo de fluido dado por las ecuaciones de Navier-Stokes, se discretiza dicha ecuación por volúmenes finitos, resultando en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = 0$$

- Se usa una simulación no estacionaria, empezando con un modelo parcialmente lleno de agua. A continuación se calcula cómo la solución cambia al avanzar un paso temporal. Finalmente se simula paso a paso hasta que se encuentra una solución semi-estable del flujo.
- Se usa el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ (Ferziger 1999). Se calcula la energía cinética turbulenta, k , y su disipación isotrópica, ϵ , a través de la solución de 2 ecuaciones en derivadas parciales. Es un modelo simplificado que utiliza parámetros en base a datos experimentales, pero que ha mostrado resultados muy buenos en un buen número de estudios numéricos (Patankar 2002).
- Como *solver* de la discretización se usa un Runge-Kutta implícito de segundo orden (Bärwolff 2004). Por el efecto de gravedad y la notable diferencia de viscosidad entre las fases, se usa el *implicit body force* como esquema de discretización espacial para estabilizar la solución.

Debido a la bidimensionalidad del modelo, las fórmulas anteriores se simplifican de modo que, cada campo y vector tridimensional se reduce a uno bidimensional, anulando la derivada en la tercera dirección. Además se omiten términos de compresibilidad. Por ejemplo las ecuaciones en la dirección longitudinal resultan:

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = 0$$

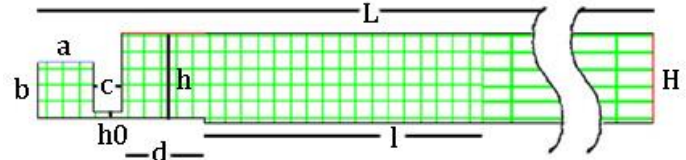


Figura 4: Esquema del mallado

Mallado. El mallado empleado (Figura 4) es de tipo estructurado con dos zonas diferentes. Las dimensiones principales se han resumido en la tabla adjunta. La primera zona tiene una malla muy fina de 0.01m x 0.01m. Es la zona inicial en la que se desarrollará el salto hidráulico y donde se obtendrán los resultados de interés. Al final de esa primera zona todavía hay mucha turbulencia en el flujo. Por lo tanto, si la salida se pusiera ahí, las condiciones de contorno del outflow influirían sobre la solución del salto forzando un reflujo artificial. Por esta razón, se ha introducido una segunda zona con celdas más largas (0.01m x 0.25m) y que sirve para que el flujo se estabilice antes de salir, evitando la influencia de soluciones no realistas sobre el salto. También se han realizado simulaciones sin mallado en esa segunda zona, obteniéndose soluciones poco realistas (véase: Figura 5), más o menos graves, dependiendo de las velocidades del flujo. El mallado se economiza para tener una buena precisión y que la simulación de un minuto de flujo no tarde más de 2 días.

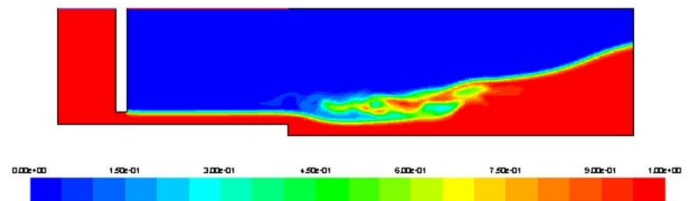
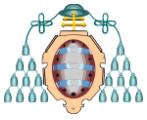


Figura 5: nivel del agua, impacto del outflow

El agua entra a través del lado a mediante una *velocity inlet* (ver Figura 4). En el techo, encima de la zona d , se ha definido un *pressure outlet* para controlar la presión del aire y mantenerla en su nivel atmosférico. Finalmente el agua sale por el lado H mediante una condición de *outflow*.



Dimensiones del mallado

| Lado | Descripción | Longitud [m] |
|----------------|--|--------------|
| a | ancho del tanque | 1 |
| b | altura del tanque | 1 |
| c | longitud del tubo | 0,5 |
| h ₀ | altura del tubo | 0,1 |
| d | distancia hasta el paso | 1,5 |
| h | altura antes del paso | 1,5 |
| H | altura del canal | 1,6 |
| l | longitud de la zona del resalto hidráulico | 6 |
| L | longitud total | 25 |

Casos de estudio. El agua entra en el tanque desde arriba con una velocidad, v_{in} . Cuando está en el estrechamiento tiene la velocidad v_0 que resulta ser unas 10 veces superior a la velocidad v_{in} . El número Froude en el tubo es por tanto:

$$Fr_0 = \frac{v_0}{\sqrt{gh}} = 10 \cdot \frac{v_{in}}{\sqrt{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,1m}} = 10,096 \frac{s}{m} \cdot v_{in}$$

El caso de partida tiene una velocidad de entrada $v_{in}=0,4m/s$, que corresponde con $Fr \sim 4$. Además se analizan otros casos en función del tipo de salto hidráulico, que se muestran en la tabla siguiente. Para facilitar la nomenclatura los casos se han designado según su número de Froude aproximado.

Primero, con el caso inicial, se intenta validar el método y el mallado, investigando los efectos de diferentes condiciones de inicio para luego comparar resultados con otros estudios. También se observa el comportamiento de diferentes valores físicos en el área del salto y el desarrollo del salto. Luego, los otros casos serán analizados en forma más general y se evaluará la bondad de la simulación para cada caso.

Todas las figuras muestran sólo los primeros 9 metros del mallado, en la zona de malla fina, a no ser que se diga de forma explícita que se trata de una región diferente.

Datos de los casos

| v_{in} [m/s] | Fr | Fr (aprox.) | tipo de salto |
|----------------|-------|-------------|---------------------|
| 0,15 | 1,514 | 1,5 | ondulado |
| 0,22 | 2,221 | 2,2 | débil |
| 0,4 | 4,039 | 4 | inestable |
| 0,6 | 6,058 | 6 | estable intensivo |
| 1 | 10,01 | 10 | fuerte hipercrítico |

Resultados. A continuación se muestran los resultados más destacables de la simulación numérica.

Froude 4. Con un número de Froude $Fr=4$ se debe desarrollar un salto inestable, más grande y con turbulencia moderada. La altura del flujo tras el salto, según la fórmula unidimensional, debe ser:

$$h_2 = \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - \frac{1}{2} \right) \cdot h_1$$

$$= \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8 \cdot 4,039^2} - \frac{1}{2} \right) \cdot 0,1m = 0,523m$$

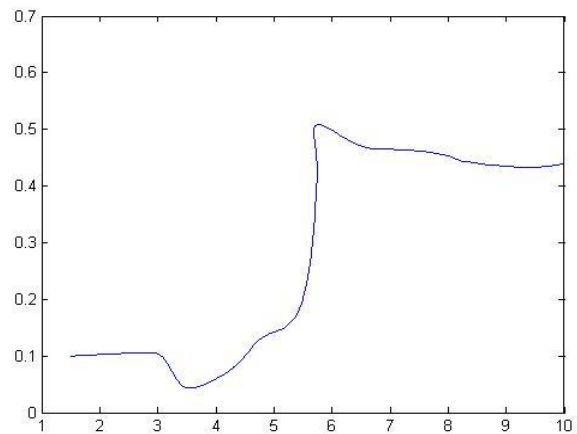


Figura 6: Isosurface de 50% agua (Fr 4).

En la **Figura 6** se ve que la altura de la línea de un contenido de un 50% de agua se estabiliza en un valor sobre 0,41m. El suelo del canal está a 0,1m por debajo de la cota cero, así que resulta una altura del flujo tras el salto de $h_2=0,51m$. Por lo tanto el valor coincide perfectamente con el valor teórico. El valor de la altura proviene de la zona de malla más basta, pero aún así se consigue un acuerdo muy bueno.

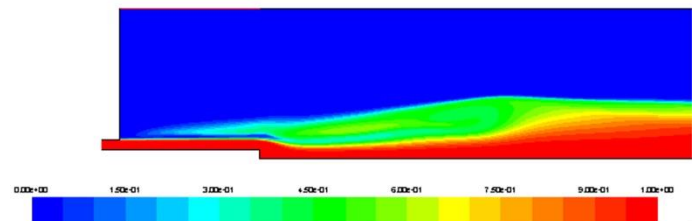
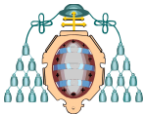


Figura 7: Porcentaje de agua (Fr4)

En la **Figura 7** se ve la fracción de agua en el salto hidráulico para $Fr=4$ en la zona principal. Con una longitud de aproximadamente 4m, se



puede considerar un salto de gran extensión. El vórtice principal sigue girando durante toda la simulación, así que se trata de un salto inestable.

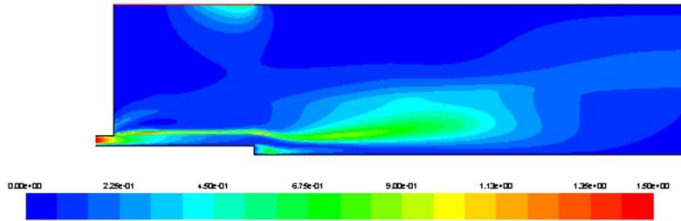


Figura 8: Energía cin. turbulenta (m^2/s^2) (Fr4)

En la Figura 8 se muestra la turbulencia en el salto. La energía cinética de la turbulencia es del orden de $1 m^2/s^2$, que, como se verá, se puede considerar una turbulencia moderada.

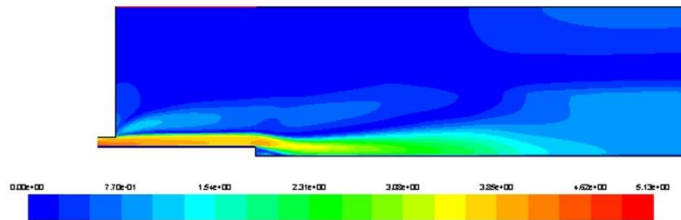


Figura 9: Magnitud de velocidad (m/s) (Fr4)

En Figura 9 se puede ver la velocidad del flujo. La velocidad del vórtice y otros fenómenos de turbulencia es más o menos del mismo orden que la velocidad del flujo tras el salto.

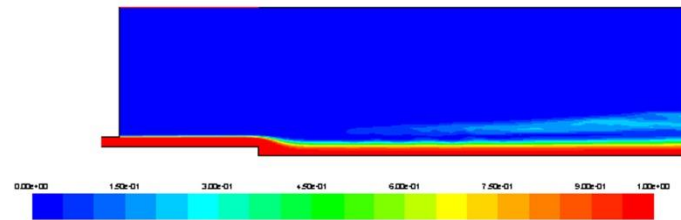


Figura 10 porcentaje de agua, inicio vacío (Fr4)

La Figura 10 muestra el resultado que se obtiene cuando el mallado está vacío al principio. Faltan fuerzas de inercia y el agua sigue con velocidad alta. El paso en el suelo del canal no es suficiente para iniciar el salto.

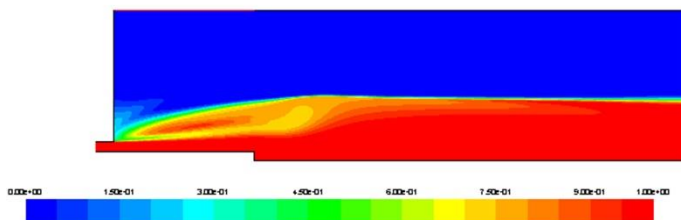


Figura 11: porcentaje de agua, inicio lleno (Fr4)

Si al contrario, el mallado está relleno con un nivel alto de agua al principio, como es el caso de la Figura 11, la inercia del agua es suficiente para iniciar el salto y ni siquiera se necesita el escalón en el suelo.

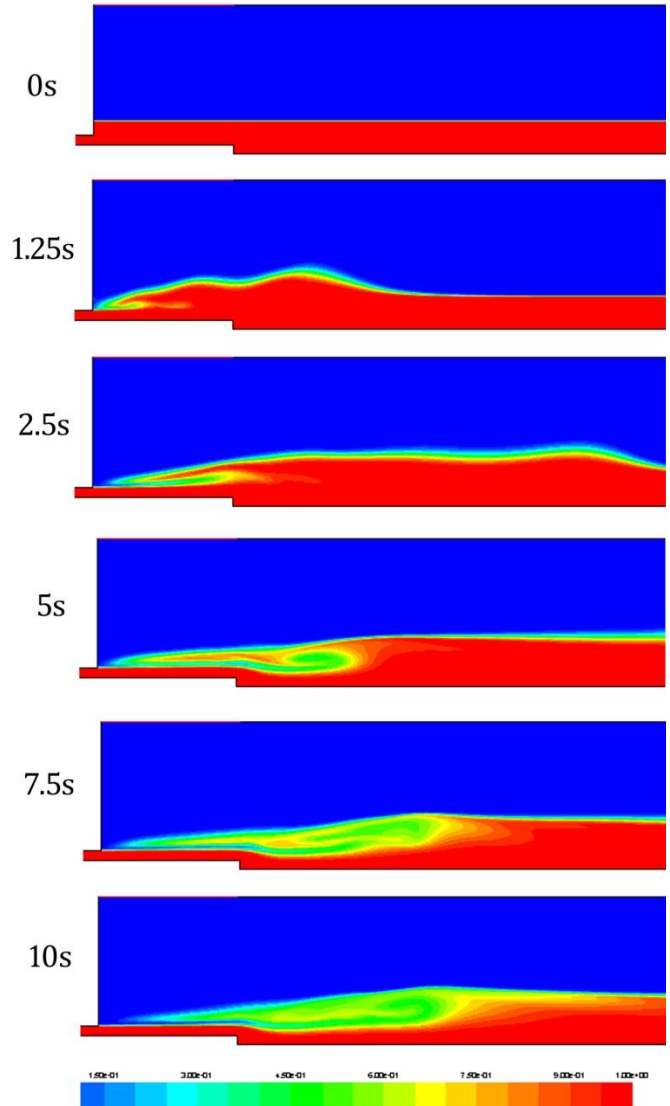
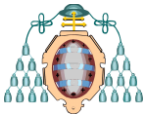


Figura 12: Evolución del salto (Fr4)

En la Figura 10 se ve la evolución temporal de un salto con el canal relleno de agua hasta 0,25m de altura. El resultado final ya se mostró en la Figura 7. Al principio (1,25s) se crea una onda parecida a la de un salto ondulado y una discontinuidad en la capa de agua. La zona previa al lugar donde estará el salto está cubierta de una capa estanca de agua. Luego (5s) la onda se mueve hasta el final del canal y desaparece. La discontinuidad empieza a transformarse en un



vórtice, todavía relativamente pequeño y la capa de antes se hace más fina. Con el tiempo el vórtice se vuelve más grande y estable. Después de 10 segundos sólo queda una zona de aireación fina antes del salto.

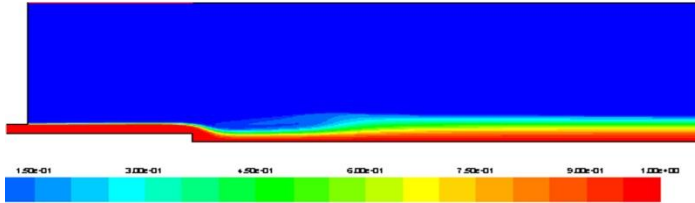


Figura 13 Porcentaje de agua (Fr1,5)

Froude 1,5. Para el caso de $Fr=1,5$ la Figura 13 muestra que el resalto tiene una transición muy suave. La altura teórica según la fórmula unidimensional es de 0,17m que coincide muy bien con la altura numérica de aproximadamente 0,18m. La turbulencia es bastante baja, con magnitudes del orden de $0,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en el zona del resalto. Una vez estabilizada la forma del salto, ésta ya no se cambia, por lo que se trata de un escenario semi-estable.

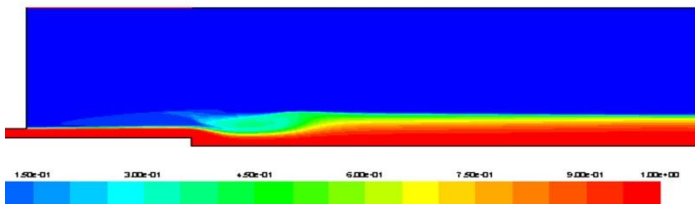


Figura 14 Porcentaje de agua (Fr2,2)

Froude 2,2. En la Figura 14 se muestra el salto en el caso de $Fr=2,2$. Se trata de un salto débil. Se puede intuir la formación de un vórtice débil, así como una longitud de tan sólo 1m, por lo que se trata de un salto bastante corto. Una vez superado el salto el flujo se estabiliza fácilmente.

Complementariamente, la altura después del flujo, de aproximadamente 0,3m concuerda nuevamente muy bien con el valor teórico (0,268m). Hay poca turbulencia con unos $0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en el centro del vórtice, que supone un pequeño incremento respecto del caso previo de $Fr=1,5$. También se trata de un flujo semiestable.

Froude 5,0. Aunque no se muestra aquí, se ha realizado también una simulación con un número de Froude de 5. En ella, se observa un comportamiento muy parecido al flujo con $Fr=4$,

aunque aparece una discontinuidad un tanto más intensiva acompañada de un vórtice más suave.

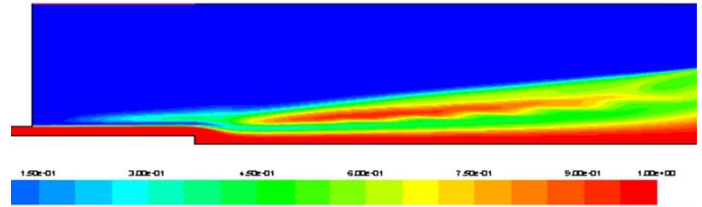


Figura 15 Porcentaje de agua (Fr6)

Froude 6,0. Para saltos ya muy intensos, como puede ser el uso de un número de Froude igual a 6 (Figura 15), se observa claramente cómo el desarrollo del salto es mucho más exagerado que en los casos anteriores. Hay zonas grandes donde aire y agua se mezclan violentamente por los efectos de rotación turbulenta, que llega hasta unos $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Las visualizaciones numéricas cumplen las expectativas bastante bien, pero debido a las grandes velocidades que se alcanzan en el estrechamiento, el fin del salto se sale de la zona principal, interfiriendo con los límites del modelo. Como la zona después del salto ya está inmersa en la zona de mallado basto, no se puede medir un valor exacto de la altura, pero se puede estimar del orden de unos 0,8-0,9m, que coincide bien con los 0,808m teóricos.

Froude 10

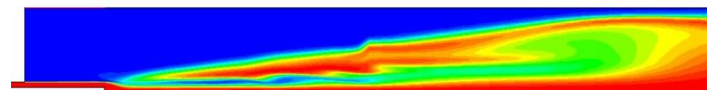
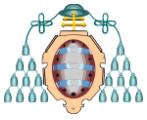


Figura 16: Esquema del salto Fr10 (ambos zonas)

Para el salto con un número de Froude cercano a 10 ya no sirve el modelo. Como se observa en la Figura 16, el salto presenta una extensión muy grande y casi toca en el límite superior del dominio del canal. Aún así se aprecia perfectamente cómo su desarrollo es mucho más brutal que en los casos anteriores.

MÉTODO EXPERIMENTAL

El experimento se ha realizado en un canal hidrodinámico (véase Figura 17). Dicho canal es un circuito cerrado en el que se bombea agua desde un depósito de almacenamiento hacia la entrada del canal donde se ha colocado una pared



que permite medir el caudal. Tras una distancia, el agua se acelera a través de un escalón para producir un flujo supercrítico. Finalmente, se genera un resalto hidráulico en una zona libre del canal. Además se ha introducido una apertura al final para regular las condiciones de contorno de salida y permitir un flujo semi-estacionario que facilita controlar la posición del salto.

$$Q \approx 0.54 \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \cdot b$$



Figura 17 El canal utilizado

Para producir un salto con transición completa ($Fr > 1.7$), manteniendo un tamaño razonable del experimento, se intenta llegar a un escenario donde el flujo justo antes del salto hidráulico tenga un número de Froude cercano a 3. Aunque el número de Froude no se puede medir de manera directa, sabiendo el caudal y una medida de la altura antes y después del salto, permite calcular los números de Froude en ambas posiciones.



Figura 18 Medida de caudal (i.) y altura (d.)

Dicho caudal se consigue medir a través de vertederos. Cuando el agua sale del depósito inicial pasa por una pared delgada (Figura 18). Suponiendo que, debido a la geometría del flujo, hay flujo crítico se puede aplicar la aproximación de Boussinesq de tal manera que, como única variable para calcular el caudal, se necesita la altura encima de la pared, resultando:

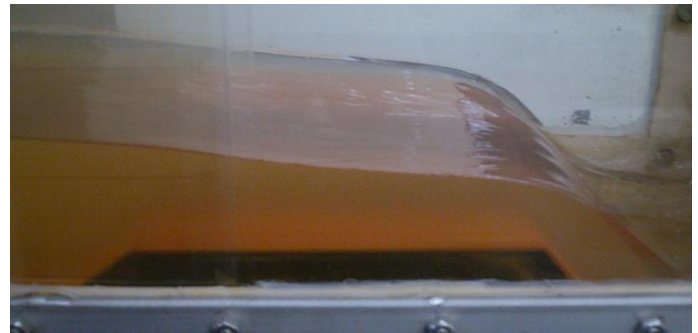


Figura 19 Escalón

Después del vertedero de medida y tras pasar una zona que estabiliza el flujo de agua, se encuentra el escalón (Figura 19) que fuerza una aceleración del flujo y la formación de un flujo supercrítico con altura baja y alta velocidad. A continuación, tras el escalón, el agua sigue fluyendo en estado supercrítico hasta que se frena por la altura de agua que está en la zona final del canal. En ambas zonas la altura del flujo se obtiene con un medidor de nivel calibrado. Además, para que el agua no simplemente salga en estado supercrítico, en la salida el agua se frena con una apertura.

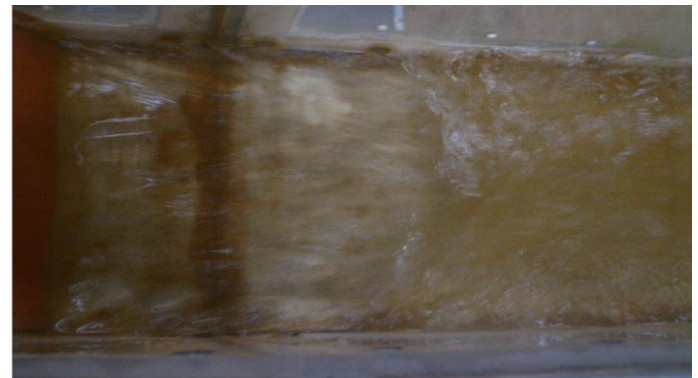
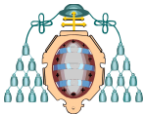


Figura 20 Salto experimental ($Fr=3$)

Finalmente, con dichas condiciones, se desarrolla el salto mostrado en la Figura 20, para un caudal de $Q=7.71$ l/s. En este caso, se ha medido una altura de 2.15cm, que conlleva una velocidad de 1.435 m/s o un número de Froude de $3.1 \sim > 3$, justo antes del salto. En comparación, el flujo estabilizado tras el salto tiene una altura de 6cm, que resulta en una velocidad de 0.51 m/s, o lo que es lo mismo, un número de Froude de 0.67.



Aunque la diferencia entre la altura experimental y la de la fórmula teórica unidimensional, cuyo resultado es una altura de 8.4cm, es relativamente alta, considerando los métodos de medida un tanto simples, la contrastación realizada es razonable.

Cabe resaltar que a pesar de las discrepancias cuantitativas, la forma coincide perfectamente con lo esperado, puesto que se observa un flujo turbulento, característico de un caso inestable con importantes fluctuaciones en la superficie libre.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio numérico de las condiciones de formación y desarrollo de un resalto hidráulico en canal bidimensional bajo distintos regímenes de flujo. Se ha utilizado un software comercial, con un modelo bifásico y no estacionario para la evaluación temporal de la superficie libre. Se ha complementado el estudio con una visualización experimental en un banco de ensayos que reproduce adecuadamente las condiciones modelizadas.

Se concluye que la modelización numérica predice razonablemente bien las condiciones de formación y desarrollo del resalto en la mayoría de los casos simulados. Así, por ejemplo, aunque en el caso de número de Froude 1,5 no se puede observar claramente la forma ondulada, tanto la magnitud de turbulencia como las alturas de las zonas de flujo obtenidas son coherentes. La falta de la onda típica se puede justificar por el modelo utilizado, que ha sido diseñado para números de Froude moderados. Además la transición muy débil complica la visualización de una forma geométrica exacta.

Complementariamente, el resto de los casos coincide mucho mejor con los resultados presentes en la bibliografía, aunque en comparación con otros estudios, parece sobreestimarse un poco el número de Froude necesario para la transición a un salto diferente. Esto se ha observado, por ejemplo, en el caso con número de Froude 5, donde todavía se observa un comportamiento parecido al de un resalto inestable (propio de números de Froude menores de 4.5), si bien influenciado con tan sólo algunas características de un salto estable intensivo ($Fr > 4.5$).

Finalmente, respecto al último caso ($Fr=10$), ya no se puede establecer ninguna conclusión rigurosa, debido al hecho de que el salto se desarrolla en la zona de mallado más vasto.

El escalón ha mostrado resultados muy buenos para iniciar el resalto, de manera que hasta las velocidades más altas (con niveles iniciales de agua muy bajos) proporcionaron los resultados esperados.

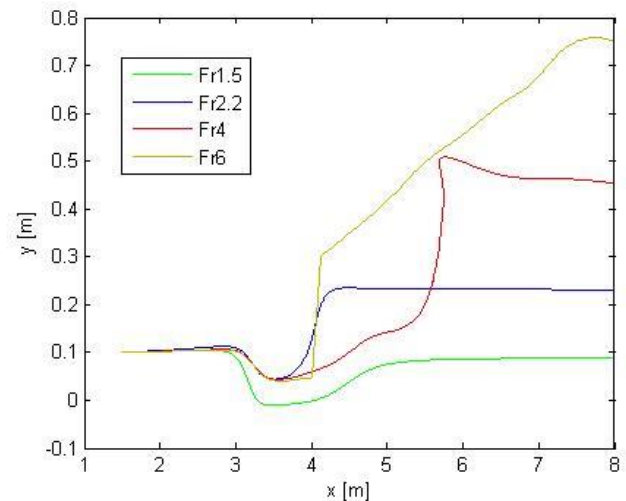
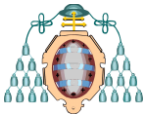


Figura 21 Comparación de niveles de agua

Por último, en la Figura 21 se ha añadido una comparación de los saltos principales a través de las líneas de interfaz (aquellas con un porcentaje de 50% de contenido de agua) de los distintos casos. La forma del flujo con $Fr=6$ ha sido interpolada linealmente en la zona de generación de vórtices para facilitar la comparativa. Se puede apreciar claramente cómo la forma, altura e inclinación del resalto van evolucionando conforme cambia el régimen de salto.

Respecto a la visualización experimental, también se muestra una concordancia relativamente buena con lo esperado, aunque más de forma cualitativa que cuantitativa. Sin embargo, considerando los medios rudimentarios utilizados para el estudio experimental, la coincidencia se puede considerar bastante razonable.

Para concluir, se pueden comparar los resultados de ambos estudios (ver figura 22), en la que se ve que la tendencia general, con una zona lisa antes del salto seguido por una zona muy turbulenta, con fenómenos de vórtice, y un flujo



de mayor altura a la salida en ambos casos. La comparativa pone también de manifiesto que el estudio numérico sobreestima un tanto el contenido de agua en la zona antes del salto.

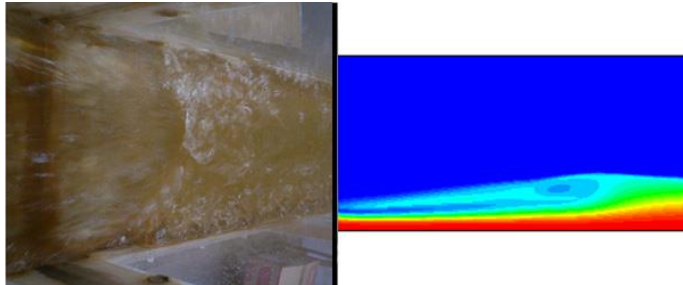


Figura 22 Comparación del estudio numérico y experimental (ambos $Fr=3$)

En este trabajo se han investigado los resaltos hidráulicos de modo numérico y experimental y se ha constatado la bondad del método de iniciar saltos a través de un escalón. Aunque ya se han realizado muchos trabajos sobre diversos aspectos de los resaltos hidráulicos, todavía queda mucho margen para la investigación. Entre éstos, cabe destacar el interés por una investigación más detallada del salto resultante de un chorro chocando en una placa o del proceso de transición entre los diferentes estados de saltos con una más fina variación del número de Froude.

NOMENCLATURA

escalares:

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| x,y | coordenadas |
| u,v | velocidad en dirección x,y |
| ρ | densidad local |
| t | tiempo |
| C | function fraccional del VOF |
| η | viscosidad cinética local |
| λ | constant de Lamé ($\sim -2/3\eta$) |
| p | presión local |
| Fr | número de Froude |
| g | gravedad |
| h | altura del flujo |
| q | caudal bidimensional |
| z | profundidad del sistema |
| Q | caudal, $Q=q*z$ |

vectores:

| | |
|-----|------------------|
| v | velocidad local |
| f | fuerzas externas |

símbolos y índices:

| | |
|------------|--------------------------------|
| ∇ | Operador matemático de Nabla |
| Δ | Operador matemático de Laplace |
| x,y | coordenadas |
| in,out | entrada, salida |
| c | critico |
| ∂ | Operador de derivación parcial |

AGRADECIMIENTOS

REFERENCIAS

Abbaspour et. al. 2009

Abbaspour, A., Farsadzadeh, D., Dalir, AH, Sadraddini, AA: Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models. In: Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences 33 (2009), Nr. 1, p. 61-72

Axelsson y Knutsson 2011*

Axelsson, J., Knutsson, R.: Numerical modeling of a slotted flip bucket spillway system-The Shibuya Hydropower Project., KTH, Dissertation, 2011

Bärwolff 2004

Günter Bärwolff, Gottfried S.: Höhere Mathematik für Naturwissenschaftler und Ingenieure (Matemática avanzada para ingenieros). 2004

Bohr et. al. 1997

Bohr, T., Putkaradze, V., Watanabe, S.: Averaging theory for the structure of hydraulic jumps and separation in laminar free-surface flows. In: Physical review letters 79 (1997), Nr. 6, p. 1038-1041

Chanson 1995*

Chanson, H.: Air bubble entrainment in free-surface turbulent flows. In: Experimental investigations. Report CH46/95, Department of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, June (1995)

Chanson 2009

Chanson, H.: Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. In: European Journal of Mechanics-B/Fluids 28 (2009), Nr. 2, p. 191-210

Chanson y Brattberg 2000

Chanson, H., Brattberg, T.: Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump. In: International Journal of Multiphase Flow 26 (2000), Nr. 4, p. 583-607

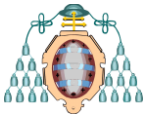
Chanson y Qiao 1994

Chanson, H., Qiao, GL: Air bubble entrainment and gas transfer at hydraulic jumps. 1994.

Csaba Hös 2007

Csaba Hös, László K.: A numerical study on the free-surface channel flow over a bottom obstacle. (2007)

Ferziger 1999



- Ferziger, J.H. y Peric, M.: Computational methods for fluid dynamics. Springer Berlin 1999
- Fluent 12.0 2009**
Fluent 12.0 User's Guide, ANSYS, Inc. – URL <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/ug/node3.htm>
- Garcia 1993**
Garcia, M. H.: Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. In: Journal of Hydraulic Engineering 119 (1993), Nr. 10, p. 1094-1117
- Hager 1992**
Hager, W.H.: Energy dissipators and hydraulic jump. Vol. 8. Springer, 1992
- Hager 2010**
Hager, W.H.: Wastewater Hydraulics: Theory and Practice. Springer, 2010. ISBN 9783642113826
- Herwig 2008**
Herwig, H.: Strömungsmechanik: Einführung in die Physik von technischen Strömungen. (Mecánica de Fluidos) Vieweg + Teubner Verlag, 2008 (Studium Technik). ISBN 9783834803344
- Hibberd y Peregrine 1977**
Hibberd, S., Peregrine, D.: Surf and run-up. Waves on Water of Variable Depth (1977), p. 114-120
- Hirt 1981**
Hirt, C.W. y Nichols, B.D.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Elsevier, Journal of computational physics 39 (1981), p. 201-225
- Margeirsson 2007**
Margeirsson, Björn: Computational Modeling of Flow over a Spillway In Vatnsfellsstífla Dam in Iceland, Gothenburg, Dissertation, 2007
- Patankar 2002**
Patankar S.V.: Computational modeling of flow and heat transfer in industrial applications, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 23 N° 3, p. 222-231, 2002
- Peregrine y Svendsen 1978**
Peregrine, DH, Svendsen, IA: Spilling breakers, bores and hydraulic jumps. In: Proceedings of the 16th ICCE, Hamburg (1978), p. 540-555
- Peyret 2002**
Peyret, Roger: Spectral Methods for Incompressible Viscous Flow. Springer-Verlag New York, 2002
- Qun Zhao 2004**
Qun Zhao, IB A. Svendsen James T. K.: Numerical Study of a Turbulent Hydraulic Jump. (2004)
- Resch et. al. 1974**
Resch, F. J., Leutheusser, H. J., Alemu, S.: Bubbly two-phase flow in hydraulic jump. In: Journal of the Hydraulics Division 100 (1974), Nr. 1 p. 137-149
- Sabbagh-Yazdi et. al. 2007**
Sabbagh-Yazdi, Saeed-Reza, Rostami, Fatemeh, Mostorakis, Nikos E.: Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. (2007), p. 168-174. ISBN 777-222-4444-66-1
- Thieault y Belmonte 2010**
Thiffeault, Jean-Luc, Belmonte, Andrew: Hydraulic jumps on an incline. In: Engineering (2010), Nr. 2008, p. 8.
- Thompson y Kilgore 2006***
Thompson, Philip L., Kilgore, Roger T.: Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. National Highway Institute, 2006
- Vischer y Hager 1995**
Vischer, DL, Hager, W. H.: Energy dissipators. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts Vol. 32 Elsevier (Veranst.), 1995
- White 1998**
White, Frank M.: Fluid Mechanics. Kingston, 1998. p. 658-708
- Wieghardt 2006**
Wieghardt, K.: Theoretische Strömungslehre (Mecánica de Fluidos teorica). Universitätsverlag Göttingen, 2006.
- Zobeyer et al. 2010**
Zobeyer, A.T.M.H., Jahan, N., Islam, Z., Singh, G., Rajaratnam, N.: Turbulence characteristics of the transition region from hydraulic jump to open channel flow. In: Journal of Hydraulic Research 48 (2010), Nr. 3, p. 395-399