

Enseñanza de fenómenos complejos en las asignaturas de Ingeniería Hidráulica mediante formación multidisciplinar

J. M. CARRILLO, L. G. CASTILLO, J. T. GARCÍA, A. VIGUERAS-RODRÍGUEZ

Grupo Hidr@m, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España, Teléfono 868071289, Fax 968338805, jose.carrillo@upct.es

Resumen. El cambio de paradigma educativo consecuencia de la adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior, acompañado con la asignación de créditos ECTS (European Credit Transfer System), dentro de los Planes de Estudio del Grado de Ingeniería Civil y del Máster de Caminos, han supuesto para las asignaturas del Área de Ingeniería hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) una revisión del sistema de trabajo. Esto ha permitido establecer una metodología docente con un equilibrio entre el volumen de trabajo teórico-práctico en aula tradicional y el aplicado (laboratorio, cálculo numérico en aula informática y visitas a campo). Los cambios introducidos permiten al alumno alcanzar las competencias asociadas a los objetivos de la titulación mediante una formación equilibrada. En este trabajo se emplea como ejemplo la metodología de enseñanza de un resalto hidráulico.

Palabras Clave: clases participativas, formación multidisciplinar, prácticas de laboratorio, prácticas informáticas, videos explicativos.

Abstract. The change of the educational paradigm due to the adaptation to the European Higher Education Area, together with the use of ECTS (European Credit Transfer System) credits in the Curricula of the Degree and Master of Civil Engineering, have generated a review of the teaching methodology in the subjects of the Hydraulic Engineering Area of the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). The distribution of the workload allow us to establish a teaching methodology that balances the volume of theoretical and applied practical work (laboratory, computer classroom and field). These changes allow students to achieve the competencies associated with the objectives of the degree and the master by using an balanced formation. This work is used as an example of the teaching methodology of an hydraulic jump.

Keywords: participatory classes, multidisciplinary teaching, laboratory, computing practices, explanatory videos.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, las asignaturas de Hidráulica de las antiguas escuelas de Obras Públicas y de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos han presentado un bajo índice de aprobados. La complejidad de las ecuaciones que los alumnos deben resolver genera a priori un sentimiento de que la asignatura es demasiado compleja, tendiendo los

estudiantes a dejarla para los cursos posteriores cuando ya no tienen tan reciente lo aprendido en las asignaturas de fundamentos matemáticos.

El uso de material visual es una forma muy eficaz de enseñanza. El estudiante consigue una mayor absorción de información cuando se utiliza información gráfica en vez de datos basados en texto. Saettler (1968) encontró que los estudiantes aprendían mejor, recordaban más y mostraban un interés mayor cuando se utilizaron películas en el aprendizaje. Kolb (1984) demostró que se reduce el tiempo de aprendizaje cuando se implica al estudiante y se le convierte en sujeto activo de su propia enseñanza. Los estudios muestran un incremento de retención de memoria cuando se compara con los métodos de enseñanza más tradicionales (Ferrer, 2014).

El Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) busca mejorar la competitividad internacional de las universidades Europeas. Se produce un cambio de paradigma educativo que no está tanto en la incorporación de actividades académicamente dirigidas y de nuevas herramientas de transmisión de información, sino en el cambio de enfoque que significa la formación orientada explícitamente al desarrollo de competencias. De esta forma, los nuevos métodos docentes deben contribuir a desarrollar dichas competencias. El protagonista del proceso es el estudiante, mientras que el profesor se concentra en una labor de facilitador, orientador o guía del aprendizaje (Naval, 2006). Dede (2008) señala que con la transformación de las tecnologías los educadores desarrollan continuamente nuevos métodos de enseñanza.

El aprendizaje es una actividad individual que se desarrolla en un contexto socio-cultural, resultado de procesos cognitivos individuales mediante los cuales se asimilan e interiorizan la nueva información, se construyen nuevas representaciones mentales significativas y funcionales, que luego se pueden aplicar en situaciones diferentes a los contextos donde se aprendieron (Cánovas y Nuñez, 2014).

En el proceso de alojamiento y asimilación de la información resultan vitales la experiencia directa, las equivocaciones y la búsqueda de soluciones. La manera en la que se presenta la información es de suma importancia. Cuando la información es introducida como una forma de respuesta para solucionar un problema, funciona como una herramienta, no como un hecho arbitrario y solitario. Por esta razón las nuevas tecnologías pueden jugar un papel fundamental en el proceso activo del aprendizaje (Cánovas y Nuñez, 2014).

Las herramientas tecnológicas (TIC) pueden fomentar la interacción rápida y la retroalimentación a la vez que pueden ser utilizadas para analizar el rendimiento de cada alumno (Hernández, 2008). Sin embargo, las TIC por sí mismas (uso de webs docentes, foros de debate, etc.), no son necesariamente un indicador de innovación docente (Hannan y Silver, 2005).

Con el fin de que el alumno sea capaz de adquirir las competencias en estas materias, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos e Ingeniería de Minas de la Universidad Politécnica de Cartagena se está llevando a cabo una formación multidisciplinar (Castillo, 2014). Las asignaturas están planteadas de modo que los estudiantes adquieren las competencias en distintos niveles escalonados donde intervienen diversas fases interrelacionadas.

2. DEFINICIÓN DEL RESALTO

Para este trabajo se ha considerado el aprendizaje escalonado de un fenómeno físico complejo como es el flujo turbulento (las partículas se mueven desordenadamente y sus trayectorias forman pequeños remolinos aperiódicos) y bifásico (mezcla agua-aire) que se genera en un resalto hidráulico.

El resalto hidráulico es un fenómeno natural observado en canales y ríos. Se produce un ascenso brusco del nivel del agua como consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua y que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo (Figura 1b), de supercrítico (régimen rápido) a subcrítico (régimen lento).

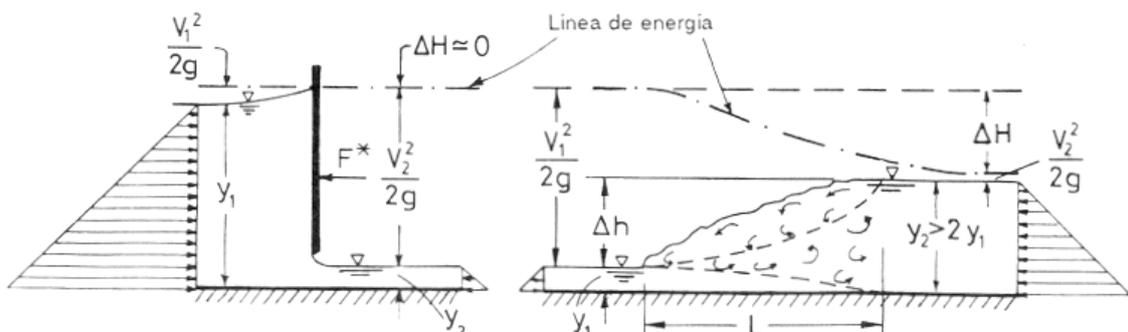


Figura 1. Cambio de régimen: a) subcrítico a supercrítico por presencia de compuerta, b) supercrítico a subcrítico (fenómeno natural cuando el momentum de sección 1 es exactamente igual al momentum de sección 2) (Naudascher, 2000)

El resalto hidráulico involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo.

En 1818, el italiano Bidone realizó las primeras investigaciones experimentales del resalto hidráulico. Esto llevó a Bélanger en 1828 a diferenciar entre pendientes suaves (subcríticas) y fuertes (supercríticas), proponiendo finalmente la ecuación que relaciona el calado supercrítico con el subcrítico en el caso de un resalto hidráulico rectangular de pendiente longitudinal horizontal, conocida como la relación de los calados conjugados.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico en el campo de la hidráulica son:

- Disipación la energía del agua descargada por los vertederos de las presas y otras obras hidráulicas, y evitar así la socavación aguas abajo de la obra.
- Recuperar altura o elevar el nivel del agua sobre el lado aguas abajo de un canal de medida y así mantener alto el nivel del agua en un canal para riego u otros propósitos de distribución de agua.
- Incrementar el peso en el cuenco de disipación y contrarrestar así el empuje hacia arriba sobre la estructura.
- Incrementar la descarga de una compuerta manteniendo rechazado el resalto.
- Indicar condiciones especiales del flujo, tales como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control siempre que se pueda ubicar una estación de aforo.
- Mezclar sustancias químicas usadas en procesos de depuración de agua.
- Aireación de redes de abastecimiento de agua en las ciudades.

Algunas de las características del resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales son:

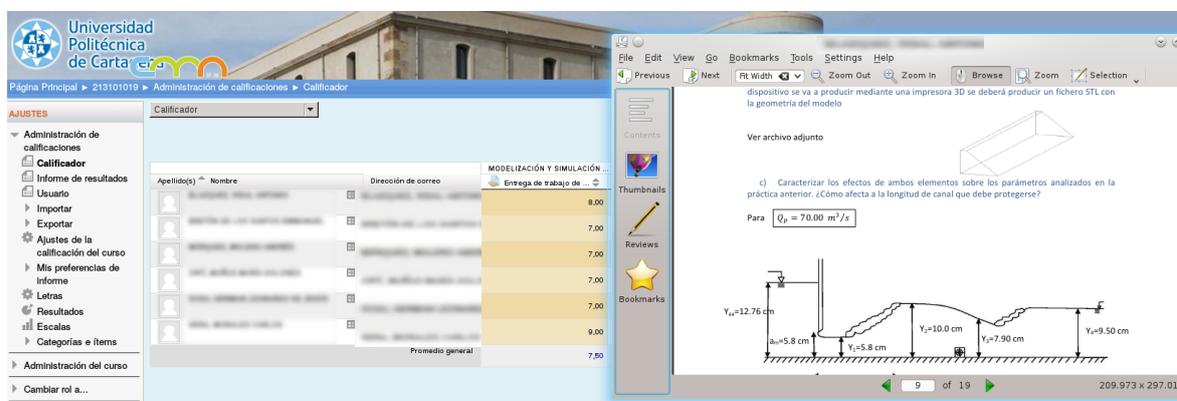
- Pérdida de energía: diferencia de las energías específicas antes y después del resalto.
- Eficiencia: relación entre la energía específica antes y después del resalto.
- Altura del resalto: diferencia entre las profundidades antes y después del resalto.

3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LAS ASIGNATURAS

3.1. Hidráulica

En la asignatura de Hidráulica (segundo curso de Grado), los estudiantes aprenden y aplican las ecuaciones fundamentales de la hidráulica en diversas situaciones y, concretamente, en el caso particular del resalto hidráulico, se aplica a un volumen de control, las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento. Las clases teóricas tradicionales se complementan con ejercicios participativos en aula y videos explicativos, realizados en el laboratorio de hidráulica por estudiantes que han tenido la oportunidad de realizar su proyecto de fin de carrera. De esta forma, los alumnos pueden observar el carácter turbulento del resalto hidráulico.

La formación se complementa con tareas realizadas en el Aula Virtual de la Universidad Politécnica de Cartagena (figura 2). La plataforma Moodle (MOODLE, 2007) utilizada es un Sistema de Gestión de Cursos de Código Abierto (Open Source Course Management System, CMS). Esta plataforma proporciona una serie de recursos activos que además integran una gestión sencilla de las calificaciones.



The screenshot shows the Moodle interface for the 'Hidráulica' course. On the left, there is a navigation menu with options like 'Administración de calificaciones', 'Informe de resultados', and 'Exportar'. The main content area displays a table of student grades. Below the table, there is a section for 'MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN' with a 'Ver archivo adjunto' button. The attached file is a simulation of a hydraulic jump, showing a channel with a flow from left to right. The simulation includes a gate and a hydraulic jump. The flow depth upstream is $Y_1 = 5.8 \text{ cm}$ and the flow depth downstream is $Y_2 = 10.0 \text{ cm}$. The velocity upstream is $V_1 = 12.76 \text{ cm/s}$ and the velocity downstream is $V_2 = 7.90 \text{ cm/s}$. The discharge is $Q = 70.00 \text{ m}^3/\text{s}$. The simulation also shows the water surface profile and the location of the hydraulic jump.

Figura 2. Ejemplo de ejercicio realizado a través del Aula Virtual

3.2. Obras Hidráulicas

En la asignatura de Obras Hidráulicas (tercer curso de Grado), los alumnos realizan prácticas en un canal de laboratorio (figura 3), donde miden calados y pérdidas de energía en diferentes configuraciones de flujo. Concretamente en el caso del fenómeno del resalto hidráulico, los estudiantes pueden observar de primera mano la formación de resaltos hidráulicos libres, rechazados y sumergidos aguas abajo de distintas estructuras (figura 4).

Las prácticas incluyen la caracterización y clasificación de los distintos resaltes en función del número de Froude inicial y la comparación de las mediciones con los resultados obtenidos por diversos autores.

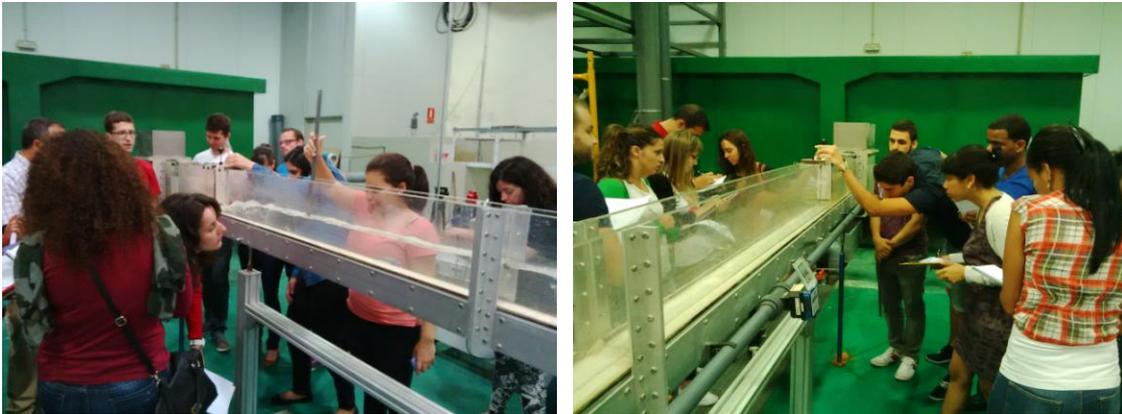


Figura 3. Prácticas de resalto hidráulico en laboratorio

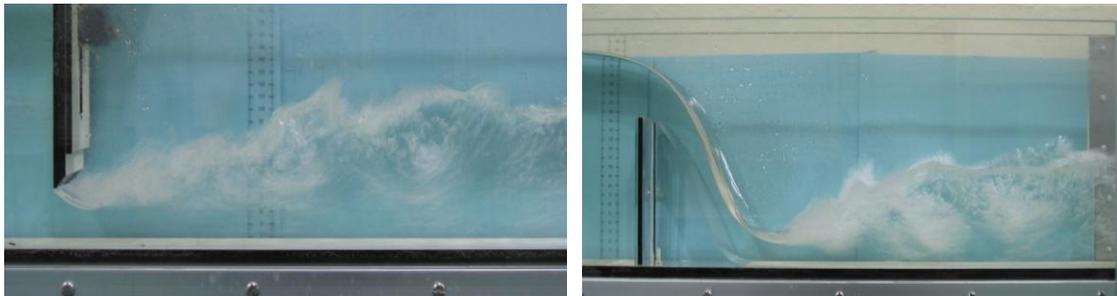


Figura 4. Resalto hidráulico obtenido en laboratorio aguas abajo de una compuerta plana y de un vertedero hidrodinámico

3.3. Aprovechamientos Hidráulicos

En la asignatura de Aprovechamientos hidráulicos (cuarto curso de Grado), la formación se complementa con prácticas informáticas en modelos unidimensionales de libre distribución. Los alumnos aprenden a identificar la posible localización de resaltes hidráulicos en encauzamientos artificiales y en entornos naturales.

En la figura 5 se observa una captura del programa HEC-RAS. El resalto hidráulico se produce cuando se iguala la cantidad de movimiento (momentum) del flujo supercrítico y subcrítico, cruzando la línea roja que define el calado crítico de la sección del canal analizado. La línea verde indica la energía del flujo. Se observa una brusca pérdida de energía como consecuencia de la disipación que se genera en el resalto hidráulico.

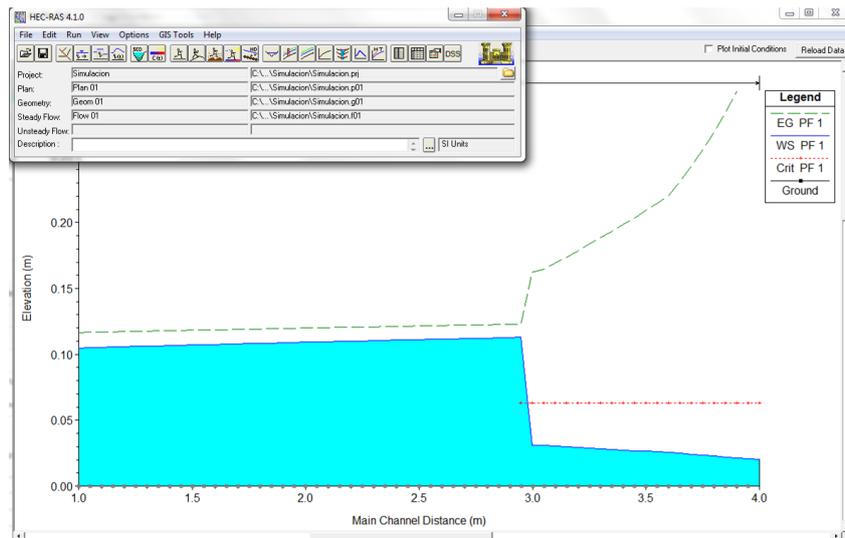


Figura 5. Resalto hidráulico obtenido con el programa HEC-RAS

La figura 6 muestra un par de casos de aplicación real que son analizado en clase: captación-conducción-desarenador y un encauzamiento. Los alumnos aprenden a identificar y calcular las diferentes configuraciones de flujo que se presentan en este tipo de estructuras hidráulicas.

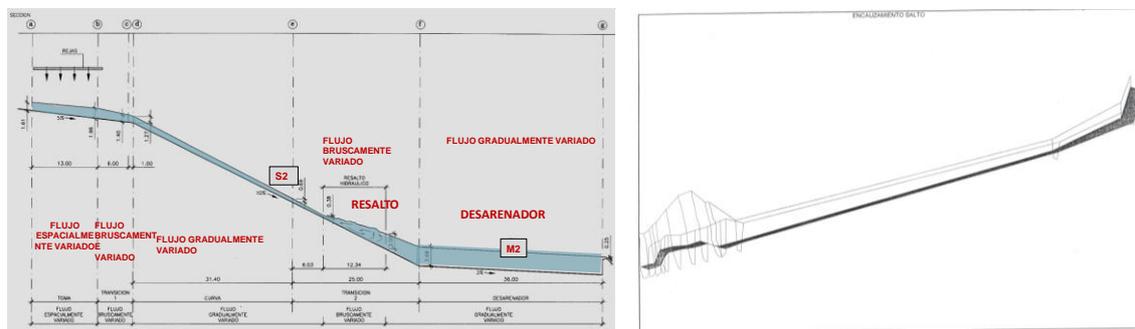


Figura 6. Análisis de diferentes configuraciones de flujo: (a) captación-conducción-desarenador y (b) encauzamiento de alta pendiente

Con esta metodología docente, los estudiantes no adquieren los conocimientos únicamente con las clases tradicionales, sino que analizan de primera mano el flujo en laboratorio y con herramientas numéricas. El aprendizaje se refuerza con trabajos reales en los que han intervenido el profesorado. De este modo, los estudiantes obtienen una utilidad real e inmediata de las lecciones que están aprendiendo.

3.4. Análisis de Flujo en Lámina Libre

En el Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, las ecuaciones teóricas se desarrollan para casos generales, en los que la forma del canal no se confina a una

sección rectangular. Se analiza las diferentes tipologías de flujos y de los resaltos hidráulicos en particular, en secciones trapecoidales, triangulares, circulares, así como aguas abajo de fuertes pendientes y aguas arriba de pendientes adversas.

Dentro de la mejora educativa planteada, los alumnos realizan prácticas de laboratorio con equipos de medición avanzados. Registran presiones con sensores piezorresistivos ubicados en la solera del canal y perfiles de velocidades instantáneas con equipos Doppler (figura 7), logrando una mejor comprensión de los fenómenos complejos analizados.



Figura 7. Medición de velocidades en resaltos con equipos Doppler

Además, los estudiantes realizan simulaciones con programas bidimensionales de libre distribución como Iber. Este programa emplea el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de aguas someras en las dos direcciones del plano horizontal (figura 8).

3.5. Presas y embalses

Un mal diseño de la estructura de disipación puede acarrear graves consecuencias para la estabilidad y seguridad del sistema presa-embalse. En esta asignatura se analizan las distintas tipologías de cuencos tipificados SAF y USBR, así como su dimensionamiento para evitar fenómenos no deseados como cavitación en los elementos de disipación de energía que se sitúan en el seno de algunos cuencos de resaltos hidráulicos. También se abordan diseños para reducir su longitud y facilitar la transición al cauce natural.

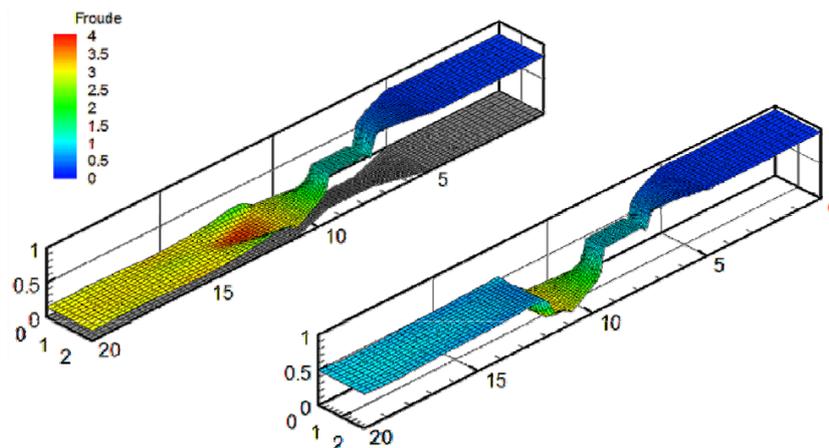


Figura 8. Resalto hidráulico generado al pie de una estructura de caída simulado con Iber (Iberaula, 2013)

3.6. Docencia adicional

Como complemento al plan de metodología docente propuesto en las asignaturas regladas, los alumnos que realizan el Proyecto de Fin de Grado, Fin de Máster y estudios de doctorado emplean equipos de laboratorio que por su complejidad, peligrosidad y fragilidad, no pueden ser empleados con equipos de trabajo de más de 3 - 4 alumnos. De este modo, se realizan: mediciones de las tasas de aireación con equipos de fibra óptica, registros de velocidades con equipos láser (Particle Image Velocimetry, PIV), y filmaciones con cámaras de alta velocidad (figura 9).

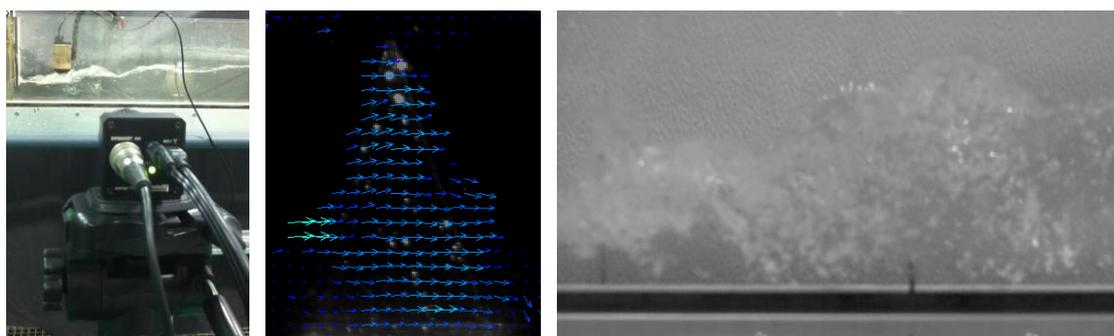


Figura 9. Resalto hidráulico medido con PIV y con cámara de alta velocidad

La formación se complementa con simulaciones en programas tridimensionales de dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD), tanto de libre distribución como comerciales. La figura 10 muestra la fracción volumétrica de aire y la energía cinética turbulenta, resueltas con el programa comercial FLOW-3D.

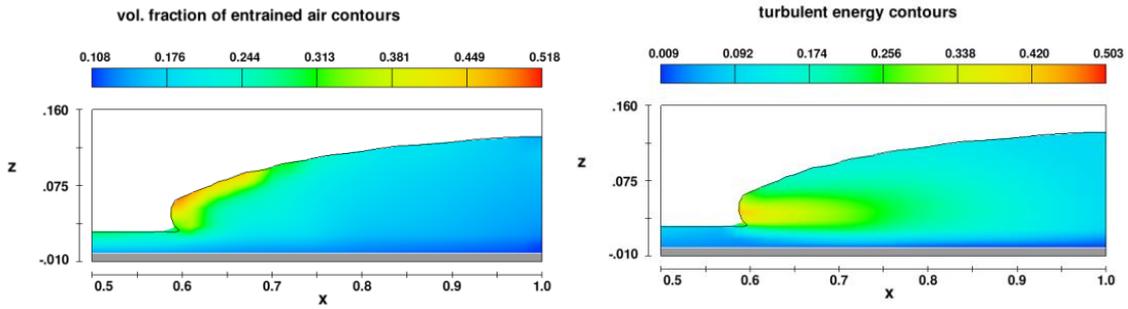


Figura 10. Resalto hidráulico calculado con programas CFD

Los resultados obtenidos con el programa CFD son comparados con los valores obtenidos teórica y experimentalmente por diversos autores en distintas secciones del resalto hidráulico (figura 11).

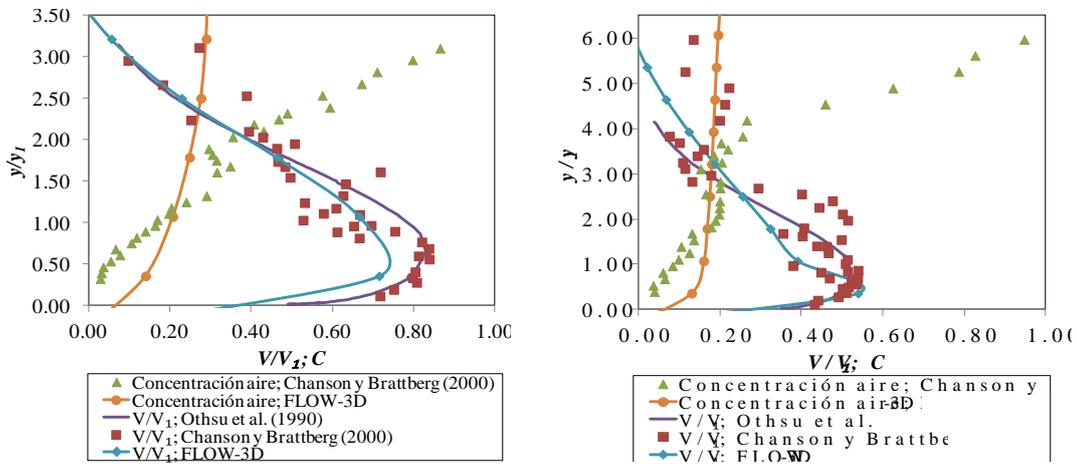


Figura 11. Comparación de los resultados de velocidad y aireación simulados con los obtenidos por diversos autores

4. CONCLUSIONES

La adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior ha permitido establecer una metodología docente con un equilibrio entre el volumen de trabajo teórico-práctico y el aplicado.

En este trabajo, se ha utilizado como ejemplo el estudio en diversas fases interrelacionadas de diferentes fenómeno complejos con flujo turbulento y bifásico como es el resalto hidráulico, el cual es ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería hidráulica.

Los estudiantes abordan los distintos fenómenos analizados en la ingeniería hidráulica mediante la aplicación de técnicas complementarias de laboratorio y simulaciones numéricas, reduciéndose la docencia más tradicional en pro de la realización de más actividades grupales e individuales. De este modo, los alumnos pierden el miedo inicial a encarar las asignaturas. Se observa una mayor participación del alumnado, el cual se siente motivado por aprender cosas que continuamente está poniendo en práctica.

Los resultados permiten al alumno alcanzar las competencias asociadas a los objetivos formativos de las titulaciones de Grado en Ingeniería Civil (2009) y Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (2011), tal y como se demuestra con el mayor número de presentados por convocatoria, así como del número de alumnos que superan las distintas asignaturas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. S. CÁNOVAS, M. Muñoz, II Congreso Internacional de Innovación Docente, Aplicación de técnicas de b-learning en el proceso de evaluación continua en el ámbito universitario, Murcia, (2014).
2. L. G. CASTILLO, J. M. Carrillo, J. T. García, II Congreso Internacional de Innovación Docente, Desarrollo de Competencias en Ingeniería Hidráulica para las titulaciones de Grado en Ingeniería Civil y Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, (2014).
3. C. DEDE, Cambridge: Berkman Center for Internet & Society at Harvard University, Immersive interfaces for learning: opportunities and perils [Motion picture], (2008).
4. ESCUELA DE TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS Y DE INGENIERÍA DE MINAS, Memoria para la solicitud de verificación del título de Graduado/a en Ingeniería Civil por la Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cartagena, (2009).
5. ESCUELA DE TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS Y DE INGENIERÍA DE MINAS, Memoria para la

solicitud de verificación del título de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cartagena, (2009).

6. ESPACIO EUROPEO DE EDUCACIÓN SUPERIOR (EEES), <http://www.eees.es/>

7. J. FERRER, M. A. Jiménez-Rodríguez, J. M. Barcia, J. Torralba, II Congreso Internacional de Innovación Docente, La Realidad Aumentada en la docencia de ciencias de la Salud. Nuevos caminos para la comprensión, Murcia, (2014).

8. A. HANNAN, H. Silver, La innovación en la enseñanza superior. Enseñanza, aprendizaje y culturas institucionales. Narcea, Madrid, (2005).

9. S. HERNÁNDEZ, Revista de la Universidad y Sociedad del Conocimiento, **Vol.(5)** (2008) El modelo constructivista con las nuevas tecnologías: aplicado en el proceso de aprendizaje

10. IBERAULA.COM. El modelo Iber. Capacidades, (2013).

11. D. A. KOLB, Experiential learning: Experience as the source of learning and development, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1984).

12. MOODLE, <http://www.moodle.org/>, (2007).

13. E. NAUDASCHER, Hidráulica de canales. Diseño de estructuras, (2000).

14. C. NAVAL, A. Sobrino, C. Pérez, Revista Panamericana de Pedagogía, **Vol.(8)** (2006) La docencia universitaria ante el proceso de Bolonia.

15. P. SAETTLER, A History of Instructional Technology, McGraw Hill, New York, (1968).