

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE UN TRAMO FLUVIAL CON UNA TURBINA DE PASO SITUADA EN SU LECHO Y LOS EFECTOS EN EL COMPORTAMIENTO DE SU LÁMINA LIBRE

Sergio A. Oller^a, Allen Bateman^b, Liz G. Nallim^c, Sergio H. Oller^d

^a*INIQUI-CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Universidad Nacional de Salta (Facultad de Ingeniería), Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, sergio.oller@conicet.gov.ar*

^b*GITS (Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos), UPC (Barcelona Tech), C/ Gran Capitán s/n "Campus Nord" (UPC) Barcelona, España, allen.bateman@upc.edu*

^c*INIQUI-CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Universidad Nacional de Salta (Facultad de Ingeniería), Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, lnallim@unsa.edu.ar*

^d*CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos En la ingeniería), UPC (Barcelona Tech), C/ Gran Capitán s/n "Campus Nord" (UPC), 08034 Barcelona, España, sergio.oller@upc.edu*

Palabras Clave: WCT, CFD (Computational Fluid Dynamics), Lecho Fluvial, Medios Porosos.

Resumen. Las turbinas de paso o WCT (Water Current Turbines) abren nuevas y mayores posibilidades, con grandes ventajas en cuanto al aprovechamiento hidroeléctrico. Éstas evitan las construcciones de costosas presas y reducen considerablemente el impacto medioambiental que producen otras soluciones de aprovechamiento energético. Pero a su vez esta solución plantea una serie de nuevos retos tecnológicos, debido a sus diseños sin todavía ningún tipo de estandarización y pocos antecedentes en su utilización. Además, a todo esto hay que agregar la complejidad que añade el estudio del comportamiento del flujo del río donde deben instalarse.

El modelo que se analiza en el presente trabajo representa un tramo fluvial con una turbina de paso axial situada en su lecho. Dicho modelo se analiza mediante la técnica de simulación numérica CFD (Computational Fluid Dynamics) y la turbina de paso se representa introduciendo en el cauce del río un bloque constituido por un medio continuo poroso para representar las perturbaciones que esta introduce y sus intercambios energéticos con el flujo del cauce. En este artículo se analizan las velocidades alcanzadas en las distintas zonas del río, presiones, líneas de corriente, y el comportamiento de la lámina libre que resulte de la presencia de la turbina representada a través de un bloque de medio poroso.

Con este trabajo se estudia un eslabón importante en la cadena de desarrollos necesarios para el diseño y factibilidad de aplicación y puesta en marcha de una turbina de paso que está actualmente en desarrollo por los autores. (Oller et al., *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, Vol.16 N°1 pp. 03-16 (2012)).

1 INTRODUCCIÓN

Para simular los efectos de la presencia de una turbina en el lecho fluvial, en este trabajo se propone un modelo simplificado que trata el escurrimiento a superficie libre (río) en el que se introduce un bloque de medio poroso (turbina), cuya perturbación en el flujo permite obtener, en forma aproximada, las nuevas velocidades y presiones en el modelo río-turbina. Estos valores obtenidos son los que luego se utilizan como condiciones de contorno en el modelo sólido-fluido que representa la turbina para un estudio más detallado de la misma (Oller et al, 2012a).

Los algoritmos de CFD (Computational Fluid Dynamics) basados en las ecuaciones de Navier-Stokes (1 a 3), que también fueron empleadas por los autores en un trabajo previo (Oller et al, 2012b), poseen la capacidad de gobernar un único volumen de control, en donde las condiciones de contorno permiten tener asignadas una superficie correspondiente a la entrada del flujo (*inlet*), y otra superficie, asignada a la evacuación del flujo (*outlet*), ambas con velocidades o presiones de fluido definidas o a calcular.

$$\text{dirección } x \Rightarrow \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{dirección } y \Rightarrow \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{dirección } z \Rightarrow \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

La particularidad que se presenta en este trabajo reside en la posibilidad de considerar dos volúmenes de control, uno dentro del otro. El externo o volumen de control 1 (VC1) representa al lecho fluvial, mientras que el interno o volumen de control 2 (VC2) representa a la turbina de paso (ver [Figural](#)).

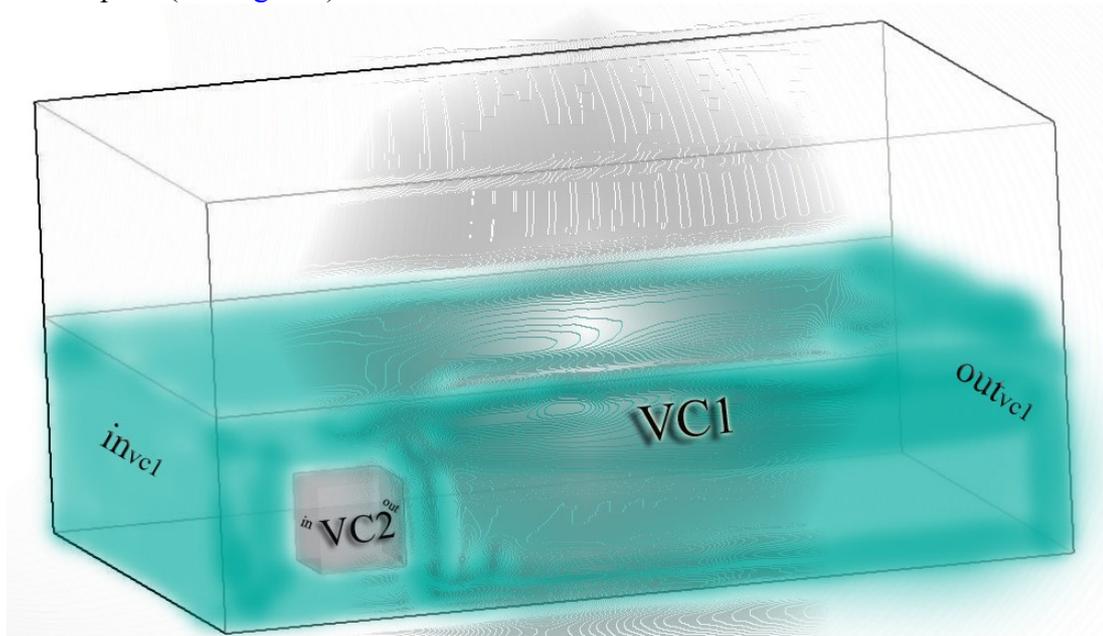


Figura 1. Representación de los volúmenes de control (VC1 y VC2)

Otra particularidad que presenta la solución obtenida en este trabajo es que a partir la solución del problema en el VC1 se encuentran las condiciones de contorno para el estudio detallado dentro del volumen de control VC2 y, que en este caso particular, ya ha sido estudiado por [Oller et al \(2012b\)](#). Por lo tanto, dicho volumen de control no es una incógnita más a resolver, sino una entrada extra que impone las condiciones de contorno a cumplir por el sistema, estableciendo así, un sistema de acoplamiento débil (“staggered”) que permite resolver paso a paso ambos sistemas “río-turbina”.

Tal y como ya se explicó, los métodos numéricos para las resoluciones de sistemas fluido-mecánicos no contemplan la posibilidad de gobernar 2 volúmenes de control, y en particular el caso en que uno de ellos (el VC2) tenga todas las condiciones de contorno ya fijadas.

Para solucionar este problema, se opta por substituir el VC2, por un bloque de medio poroso que ocasione la misma variación energética que la turbina, cuando el flujo de agua lo atraviese. Así, de esta manera, tendremos la misma transición de energía en el mismo lugar, y podremos observar el comportamiento del cauce fluvial.

2 ANÁLISIS DEL BLOQUE POROSO

La base para el cálculo de un medio poroso es la ley de Darcy (4) ([Nithiarasu P., Seetharamu K.N., Sundararajan.T., 1997](#)),

$$V = K \cdot \nabla P \quad (4)$$

donde $K = n^2 \cdot d^2 / 150 \cdot (1 - n^2)$ es la permeabilidad, V es la velocidad promedio del flujo atravesando el medio homogéneo poroso, ∇P es el gradiente de presiones, mientras que d es el diámetro medio de las partículas y n es el valor correspondiente a la porosidad del medio poroso.

Puesto que la ecuación (4) es una ley únicamente válida para velocidades de flujo muy bajas, casi únicamente permeabilidad, y dicha situación no es el caso del presente trabajo (ver [Figura 2](#)), es necesario usar una ecuación empírica que relacione de forma no lineal el gradiente de presiones con la velocidad, por ello se emplea la correlación de Ergun (ver por ejemplo: [Nithiarasu P., Seetharamu K.N., Sundararajan.T., 1997](#)).



Figura 2. Velocidades dentro del medio poroso (punto $v = 0$ corresponde al bloque)

Para completar el sistema que gobierna el flujo a través de una matriz porosa, es necesario tener en cuenta las fuerzas de arrastre en la matriz sólida (5) ([Nithiarasu P., Seetharamu K.N.,](#)

Sundararajan.T., 1997), usando la correlación de Ergun:

$$\nabla P = A \cdot V + B \cdot V^2 \quad (5)$$

$$\nabla P = \frac{[150 \cdot V \cdot (1-n)^2] + [V^2 \cdot 1,75 \cdot d \cdot (1-n)]}{d^2 \cdot g \cdot n^3} \quad (6)$$

$$\text{con } A = \frac{150 \cdot (1-n^2) \cdot \mu}{n^3 \cdot \nabla P^2} \quad \text{y} \quad B = \frac{1,75 \cdot (1-n) \cdot \rho}{n^3 \cdot \nabla P} \quad (7)$$

donde g corresponde a la aceleración de la gravedad

Considerando estas expresiones (5 y 7) y partiendo de los resultados obtenidos por Oller et al. (2012b), en donde se obtuvo un gradiente de presión de $\nabla P = -125 \text{ Pa}$ entre la entrada y la salida de la turbina, para una velocidad de $V = 2 \text{ m/s}$, resulta una porosidad equivalente de $n = 0,635$. Si se introduce dicha porosidad en la ecuación (6), obtenemos el diámetro medio de las partículas que componen el medio poroso $d = 0,36 \text{ m}$.

Estos resultados, que han permitido parametrizar el medio poroso representado por el volumen de control VC2, hacen posible ahora resolver en forma aproximada el modelo completo constituido por el cauce fluvial y la turbina.

3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN CAUCE FLUVIAL CON UNA TURBINA DE PASO WCT EN SU LECHO

3.1 Preproceso (Geometría, condiciones de contorno y malla de elementos finitos)

Obtenidos los parámetros de porosidad, se introducen como datos de entrada junto con las demás condiciones de contorno “inflow” y “outflow” en el VC1 (ver Figura 1) ($V_{in} = 2 \text{ m/s}$, $P_{out} = 0 \text{ Pa}$). Las condiciones “Slip” en las paredes o superficies en donde se cumpla que $V = 0 \text{ m/s}$, y el parámetro distancia $y = -1$ el cual permite asignar el volumen inundado inicialmente por el fluido, permitiéndole al algoritmo Level Set (LSM) (Osher, S y Fedkiw, R.P, 2001) seguir la superficie de la lámina libre de agua. Las dimensiones del modelo se muestran en la Figura 3 y la malla de elementos finitos de 1.800.000 elementos tetraédricos utilizada para la representación de ambos volúmenes, generada a través del mallador de la interface GID se muestra en la Figura 4. Dicha malla está generada teniendo en cuenta el Número de Courant-Friedrich-Levy (Courant et al 1928), el cual se alimenta de parámetros preestablecidos para asegurar el éxito de esta simulación. Estos parámetros tienen que ver con un paso de tiempo $\Delta T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ acorde a la condición de Courant, la considerable dimensión del VC1, la extensa escala de tiempo de simulación ($T = 14 \text{ s}$) que requiere el fluido para estabilizarse, y la conjugación de todo ello con una gran potencia de cálculo requerida. En este sentido, cabe mencionar que la simulación actual precisa 72hs de solver en el cluster de cálculo Acuario de CIMNE. Acuario es un clúster de memoria distribuida con base Unix, constituido por 13 nodos con 8 cores (2 procesadores quadcore) por nodo y 16 o 32 GBytes de memoria compartida por nodo (10 nodos de 16 GBytes con procesadores Intel Quad Core Xeon E5410 y 2 nodos de 32 GBytes con procesadores AMD Quad Core Opteron 2356). Para poder cargar los resultados y visualizar el postproceso, es necesario un procesador Intel i5 con 16Gbytes de memoria RAM.

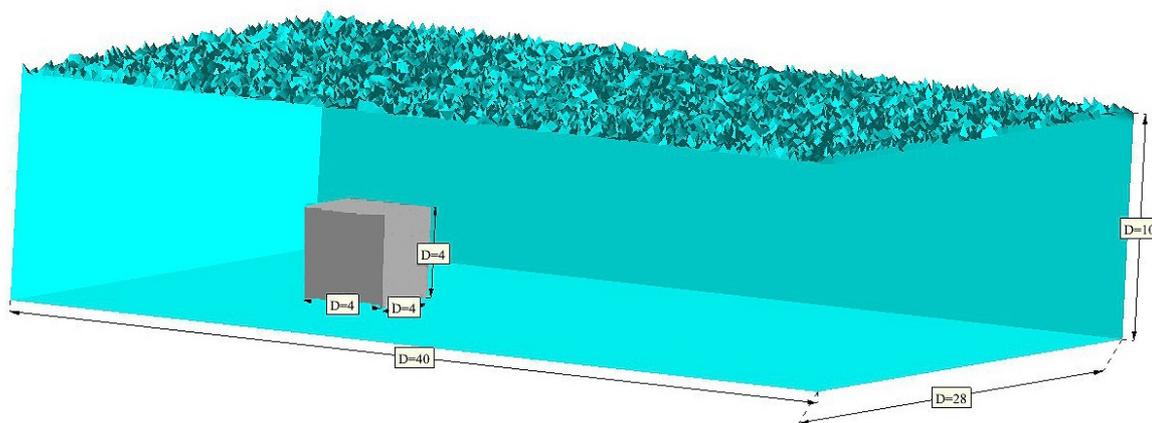


Figura 3. Cotas de los volúmenes de control (VC) en unidades del SI (m)

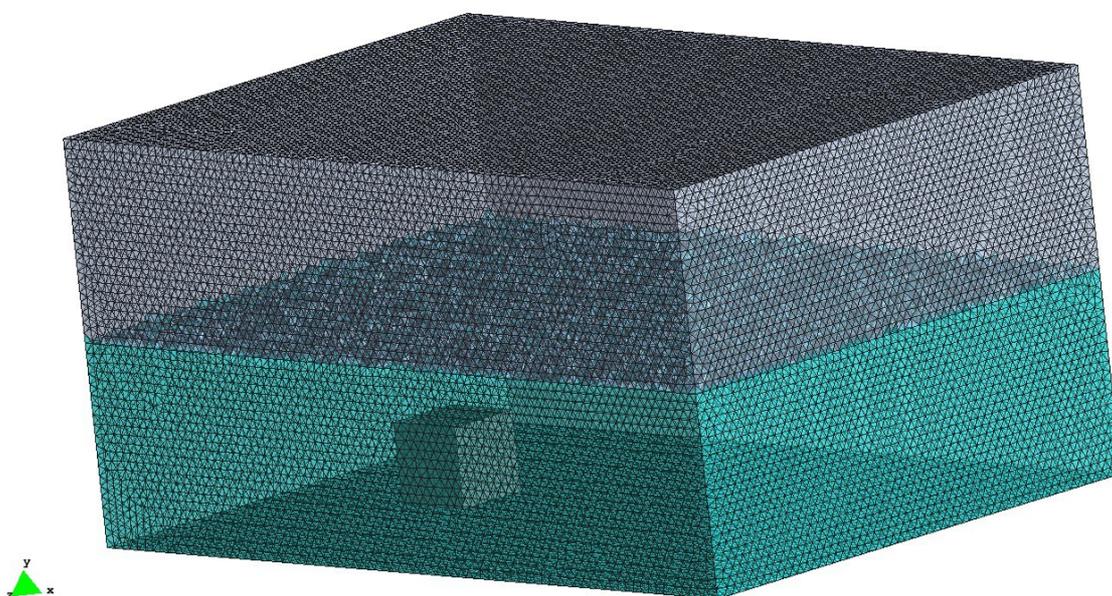


Figura 4. Detalle de la malla de elementos finitos

3.2 Posproceso y resultados

3.2.1 General

El problema compuesto con los volúmenes de control VC1 y VC2 se resuelve empleando el solver Kratos (Kratos Multiphysics, <http://www.cimne.upc.es/kratos/>), desarrollado por CIMNE y basado en las ecuaciones (1), (2), y (3).

Tras usar un clúster de cálculo, debido a la combinatoria producida por la enorme cantidad de elementos del modelo con los 14 segundos durante los cuales transcurre la simulación, se observa en los resultados, una fuerte aceleración del flujo en la lámina libre, llegando a velocidades conjugadas que rondan incluso los 6 m/s en las zonas de entrada al VC2 (ver Figura 5 y 6), generando un descenso en el calado de 3 m en la entrada de la turbina, y un resalto hidráulico de $0,5\text{ m}$ en la salida de ésta (ver Figura 7).

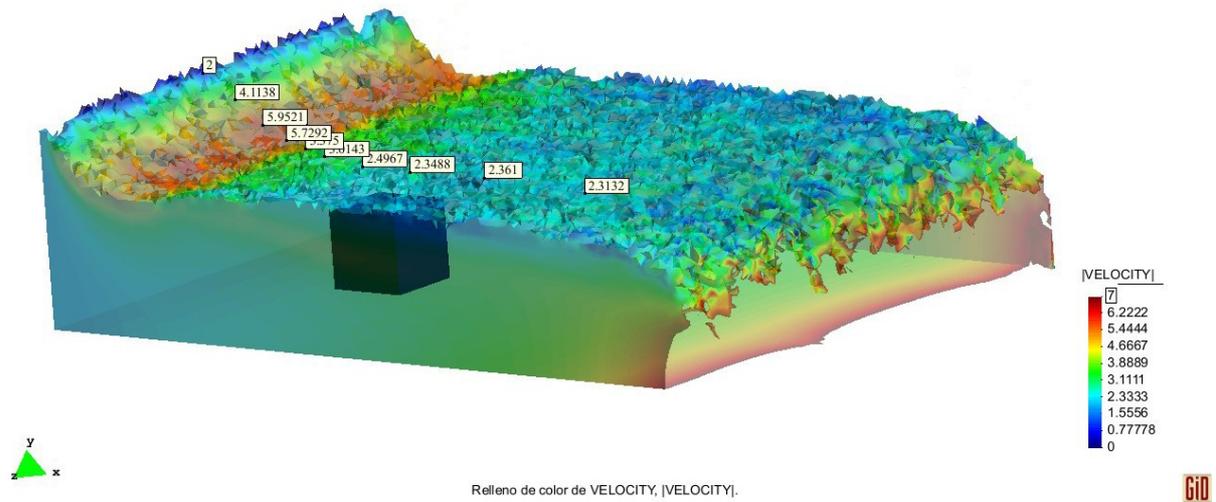


Figura5. Vista simplificada de velocidades conjugadas en el VC1

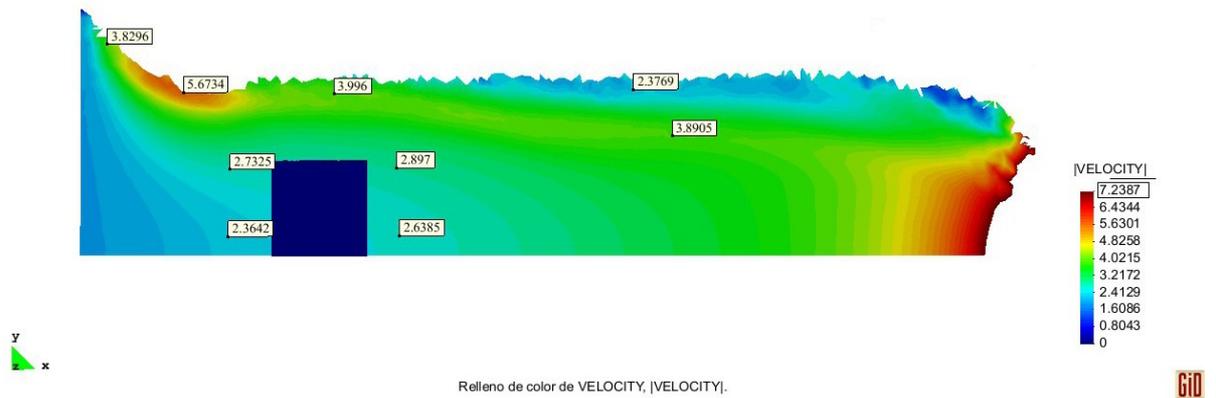


Figura 6. Diagrama de velocidades conjugadas en el VC1

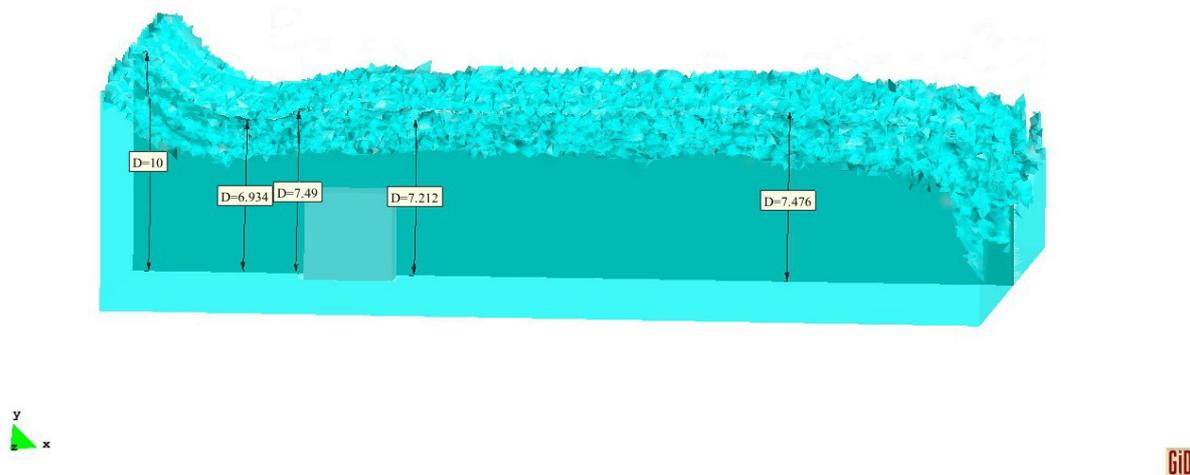


Figura 7. Cotas de calado Vs lámina libre de agua en el plano del VC2.

3.2.2 Presiones, velocidades y líneas de corriente

Los diagramas de distribución de velocidades y presiones en el *eje x* (Figuras 8 y 9) (con

límites máximos alterados, para poder focalizarse en las regiones más importantes) permiten retroalimentar el modelo tanto para el stagger río- turbina, como para parametrizar las condiciones de contorno sobre los futuros estudios localizados de turbulencias y transportes de sedimentos. La distribución de presiones en el *eje y* (Figura 10) justifica las cotas de calado de la lámina libre (Figura 7) y permitirá el estudio del río en cuanto a la transformación de la zona inundable del río aguas arriba.

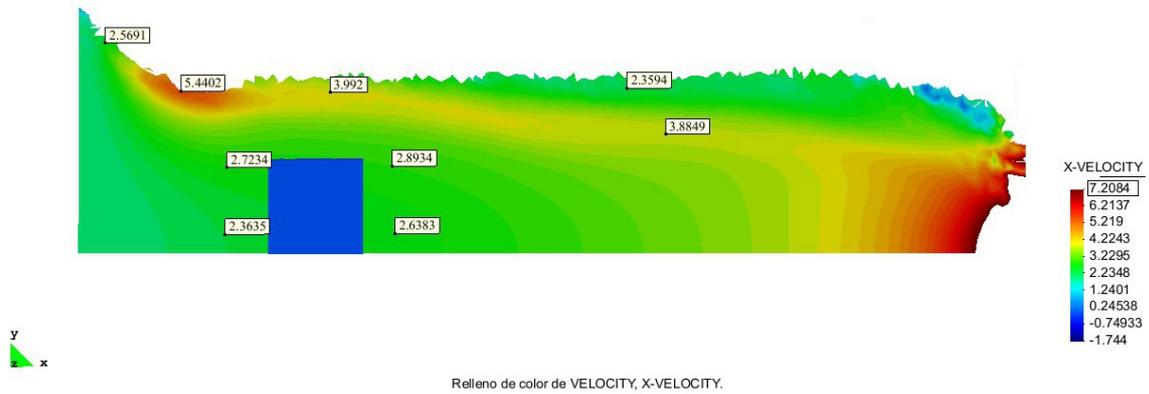


Figura 8. Diagrama de distribución de velocidades sobre el *eje x* del el VC1

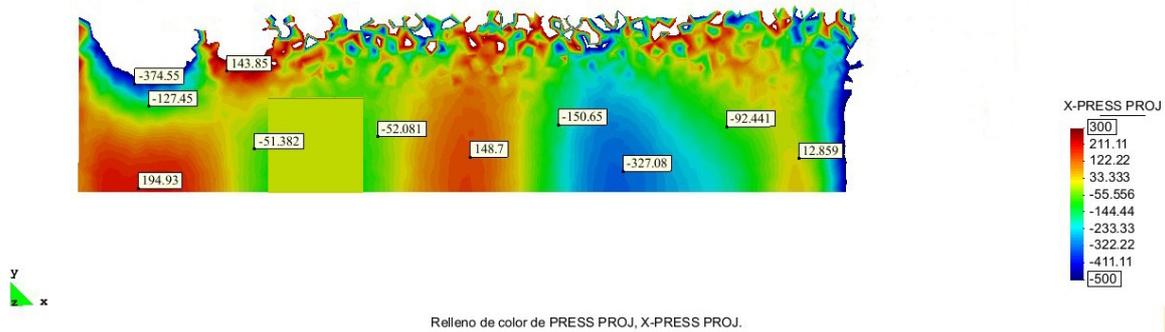


Figura 9. Diagrama de distribución de presiones sobre el *eje x* del el VC1

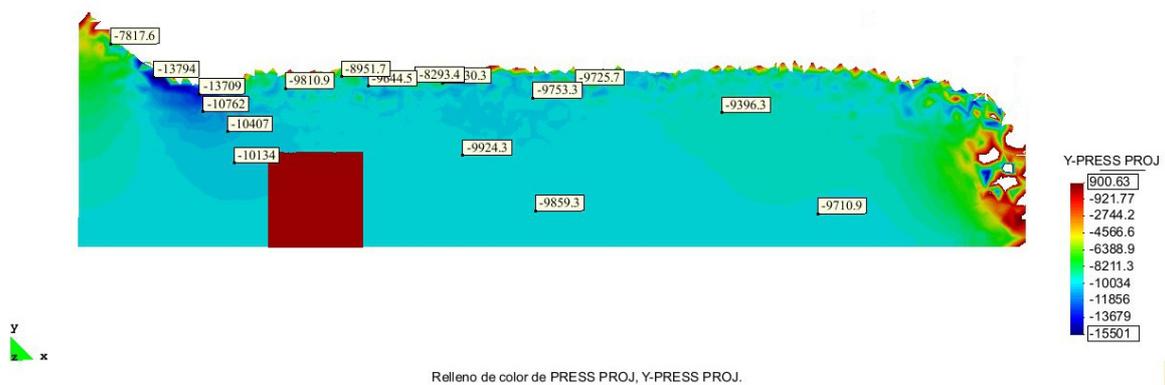


Figura 10. Diagrama de distribución de presiones en el *eje y* del el VC1

Las líneas de corriente son estables y atraviesan el bloque formado por material de medio poroso (Figuras 11 y 12), y por tanto el flujo no forma vórtices de Von Karman.

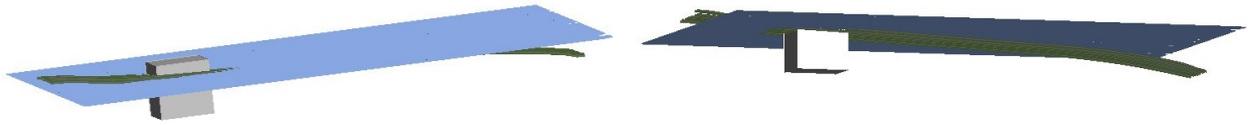


Figura 11. Vista en perfil de las líneas de corriente atravesando el VC2

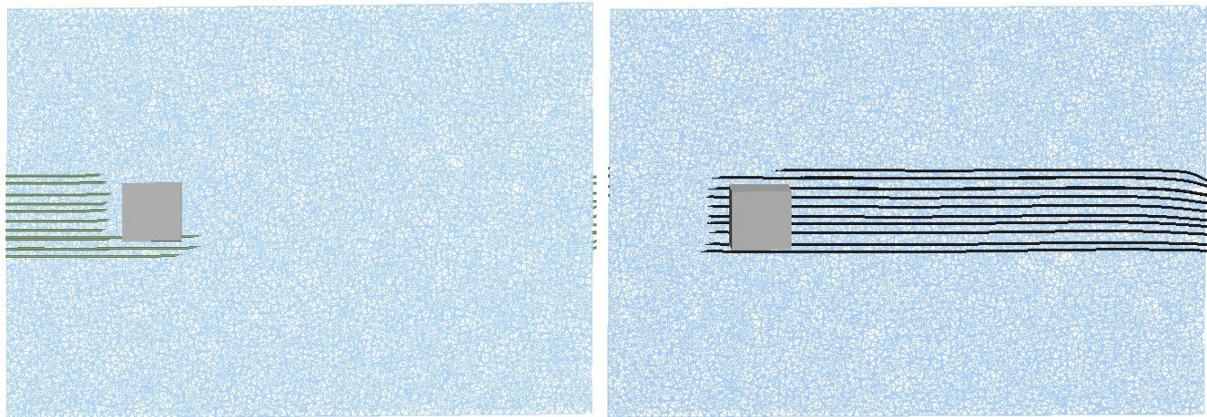


Figura 12. Vista en planta (superior e inferior) de las líneas de corriente atravesando el VC2

4 CONCLUSIONES

Observando las líneas de corriente del flujo en los resultados, y como éstas atraviesan el bloque poroso (Figura 13), es posible reafirmar la hipótesis inicial adoptada para el bloque de medio poroso, calculado en este trabajo como elemento sustitutivo de la turbina de paso (WCT) en el lecho de un río. Asimismo, se observa que dicho flujo, al cual se le aplica una pérdida de carga equivalente a la turbina calculada en Oller et al. (2012b), a través de las ecuaciones (4, 5, 6, 7 y 8); produce las consecuencias esperadas en los parámetros fluviales correspondientes al calado (Figura 7) y velocidad del cauce (Figura 6). Además, se observa que el comportamiento de la lámina libre, el resalto hidráulico resultante y las direcciones de las líneas de corriente, permitirán como línea futura, aplicar la Teoría del régimen (T. Blench, 1952), además de alimentar a un modelo más concreto para transporte de sedimentos y vorticidad, y así, poder dictaminar la factibilidad hidráulica de esta configuración de turbina de paso como solución energética.

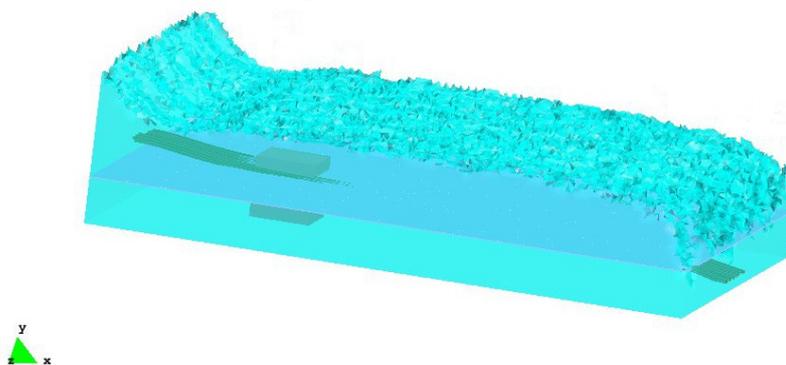


Figura 13. Líneas de corriente atravesando el medio poroso.

Varios de los resultados aquí obtenidos serán usados en un trabajo futuro, como datos de

entrada a las condiciones de contorno de un nuevo modelo de menores dimensiones y más focalizado en el flujo de entrada y de salida de la turbina. Se prevé discretizar la malla en una escala suficiente para satisfacer Kolmogorov (S. B. Pope, 2000).

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones, por el soporte económico obtenido para esta investigación: Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), España; Aula-CIMNE de la Universidad Nacional de Salta, Argentina; Consejo Nacional de Investigación Científica y Técnica (CONICET) de Argentina y al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (Proyecto CIUNSa 1903), Argentina; Proyecto AECID (A/024063/09), España. Los autores también agradecen particularmente a los doctores Ricardo Rossi y Antonia Laresse, investigadores de CIMNE, por la ayuda y orientación en el uso del programa Kratos.

REFERENCIAS

- CIMNE, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. <http://www.cimne.upc.es>
- R. Courant, K. O. Friedrichs and H. Lewy, *Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik*. Math. Ann. 100 (1928), 32.
- Gid, the personal pre and post processor. <http://gid.cimne.upc.es/>
- Kratos Multiphysics finite element method C++ opens source code. <http://www.cimne.upc.es/kratos/>
- Nithiarasu P., Seetharamu K.N., Sundararajan.T., *Natural convective heat transfer in a fluid saturated variable porosity medium*. International Journal of Heat Mass Transfer. Vol. 40, No. 16, pp. 3955-3967, 1997.
- Oller A. Sergio A., Nallim Liz G., Oller Sergio H. *Material Compuesto Vs. Acero en el conformado de un rotor de turbina hidroeléctrica – ventajas en su utilización*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol.16 N°1 pp. 03-16 (2012a).
- Oller, Sergio A. ; Coussirat, Miguel , Nallim, Liz G. *Diseño fluido dinámico de un rotor de turbina de paso con flujo axial (WCT: water current turbine), mediante el uso de métodos numéricos (CFD)*. Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Aceptado para su presentación. Octubre 2012 (2012b)
- Osher, S y Fedkiw,R.P. *Level set methods: An overview and some recent results*. Journal of Computational Physics. 2001.
- S. B. Pope, *The Kolmogorov hypotheses*. Cambridge University Press. 2000.
- T. Blench, *Regime theory for self-formed sediment-bearing channels*. Transactions ASCE, 117 (1952), pp. 383–408, 1952.