

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN SISTEMA DE
CAPTACIÓN DE FONDO CON METODOLOGÍA CFD**

Luis G. Castillo Elsitdié, José María Carrillo Sánchez
Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hdr@m. España
luis.castillo@upct.es, jose.carrillo@upct.es

RESUMEN:

Conocida la escasez de agua en el sureste español y el modo en que se presentan las precipitaciones, se plantea la necesidad de diseñar sistemas de captación en cauces efímeros con el fin de captar parte del flujo de las avenidas.

Las captaciones de fondo consisten generalmente en un sistema de rejillas situadas en el lecho de un cauce, de modo que el agua captada ingresa a través del mismo hacia una canal lateral. El comportamiento de las rejillas de fondo ha sido objeto de estudio de varios investigadores tales como Garot (1939), De Marchi (1946), Bouvard (1953), Nosedá (1956), Frank (1956), Mostkow (1957), Drobir (1999), Brunella (2003) y Righetti (2008).

Sin embargo, debido a los innumerables efectos que se producen sobre las rejillas, no es posible abordar todo el problema de caracterización con las metodologías tradicionales. Por este motivo se considera necesario realizar un estudio aplicando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional con el fin de entender mejor el fenómeno hidráulico observado en distintas experiencias de laboratorio, para lo cual previamente hay que calibrar los modelos numéricos con los resultados de laboratorio.

ABSTRACT:

Knowing the scarce of water in the Spanish South East and how the rain occurs, we considered the possibility of designing intake systems in beds of ephemeral rivers in order to try to capture part of the runoff flow.

The intake systems generally consist in a rack located in the bottom of a river channel, so that the water collected passes down the rack and leads to the side channel. The behavior of the background grids has been studied by several researchers such as Garot (1939), De Marchi (1946), Bouvard (1953), Nosedá (1956), Frank (1956), Mostkow (1957), Drobir (1999), Brunella (2003) and Righetti (2008).

However, due to the many effects that occur on the bars, it is not possible to analyze the whole problem of characterization with traditional methodologies. For this reason we consider it necessary to carry out studies with Computational Fluid Dynamics methodologies to improve in the knowledge of the hydraulics phenomenon observed in different laboratory experiences, for which we have previously to calibrate the numerical models using lab results.

PALABRAS CLAVES: captación; rejilla; CFD

INTRODUCCIÓN

Las captaciones de fondo consisten generalmente en una reja situada en el lecho de un cauce, de modo que el agua captada pasa a través de la reja. Estas estructuras han sido generalmente adoptadas en pequeños ríos de alta montaña, con pronunciadas laderas, y que presentan un lecho irregular, con intenso transporte de sedimentos y flujo de avenidas.

Con el fin de captar la mayor cantidad de agua con la menor longitud de reja, aguas arriba se realizan estructuras para el control del flujo en la entrada. Su diseño está encaminado a cumplir con dos objetivos primordiales y contradictorios: por un lado, captar la mayor cantidad de agua posible y, por el otro, derivar el mínimo de materiales sólidos, evitando la obstrucción de la reja y la entrada de materiales sólidos al canal lateral.

La eficiencia del sistema de rejillas depende de diversos factores tales como: el número de rejillas, las condiciones de entrada del flujo, la inclinación, forma y espaciamiento de los barrotes.

Su diseño, basado en consideraciones geomorfológicas, hidráulicas, estructurales y económicas, requiere especial atención para evitar el mantenimiento innecesario y los problemas de funcionamiento que no pueden resolverse fácilmente, y que tienen que ser tolerados durante la vida útil del proyecto.

Algunos de los análisis teóricos que han sido planteados asumen que el flujo sobre la reja puede ser tratado como un movimiento unidimensional con caudal progresivamente decreciente, considerando como válida la distribución hidrostática de presiones sobre la reja en la dirección del flujo.

El comportamiento hidráulico de las rejillas de fondo se ve también influenciado por la disposición de las barras. En el caso de barras longitudinales, la derivación de caudales se expresa como una función del valor de la energía de flujo local mientras que en el caso de barras transversales o perforaciones circulares, la derivación de caudales se relaciona con la profundidad de flujo local (Mostkow, 1957).

Noseda (1956) estudió diferentes tipologías de rejillas de captación. Los experimentos se realizaron con cuatro tipos diferentes de rejillas, formadas con barras de aluminio de perfiles *T*, con el ala horizontal dispuesta paralelamente a la dirección de la corriente, o perfiles *L* con el lado mayor horizontal perpendicular a la dirección del flujo. Las barras empleadas tenían la misma anchura, pero en la disposición longitudinal se modificó la anchura de la hendidura entre ellas. En los ensayos se midieron los perfiles longitudinales del flujo y el caudal captado por la reja.

Las mediciones de las velocidades sobre la superficie libre llevaron a Brunella et al. (2003) a confirmar que los efectos de disipación son insignificantes, excepto al final de la reja donde, debido a efectos locales de la profundidad del flujo, la fricción aumenta significativamente.

Righetti et al. (2000) determinan que se puede obtener el diferencial del caudal captado en el sistema de rejillas mediante la siguiente expresión:

$$dq(x) = C_q \omega \sqrt{2g(H_0 + \Delta z)} dx \quad [1]$$

donde ω es el área total libre entre rejillas, dx es el diferencial de longitud de reja en la dirección del flujo, H_0 es la energía específica al inicio de la reja, Δz es la diferencia de calado entre la sección inicial de la reja y la analizada. $C_q = \text{sen}(\alpha)$, es el coeficiente de descarga, donde α es el ángulo del vector velocidad saliente de la reja con la dirección del plano de la reja (Figura 1).

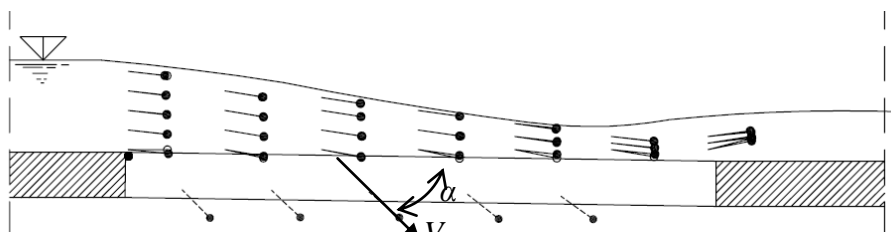


Figura 1.- Inclinación α de las líneas de corriente del caudal derivado en la reja (Righetti et al., 2000)

OBJETIVOS

Debido a la existencia de fenómenos de despegue del flujo y alta turbulencia que dificultan el estudio con metodologías tradicionales, se considera necesario realizar una modelación numérica de estas estructuras análogo a los experimentos realizados en campo y laboratorio. Con este fin se aplicaron dos programas comerciales de Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*), buscando los siguientes objetivos:

- Verificar la capacidad de los programas *CFD* (*ANSYS CFX* y *FLOW 3D*) como herramientas de análisis del flujo sobre rejillas de captación de fondo.
- Comprobar la fiabilidad de las soluciones, realizando una comparación con los resultados experimentales obtenidos por Nosedá (1956).

MODELO FÍSICO

El modelo empleado por Nosedá (Figura 2) consiste en un canal de aproximación de 8 metros de longitud y 0,50 metros de ancho, al final del cual se sitúa el sistema de rejillas, el canal de salida y el canal de recogida del flujo captado. Las paredes se construyeron en plexiglás permitiendo visualizar el flujo desde el lateral.

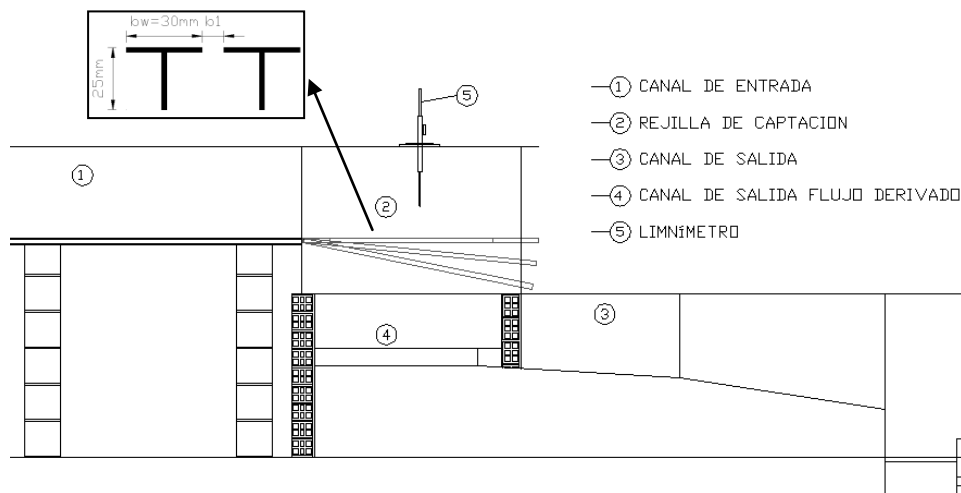


Figura 2.- Modelo de Nosedá (1956) para el estudio de sistemas de captación de fondo

Los ensayos que se analizan en este trabajo corresponden a las rejillas de aluminio de perfiles *T* con el ala horizontal dispuesta paralelamente a la dirección de la corriente. Las barras empleadas tenían la misma anchura, pero en la disposición longitudinal se modificó la anchura de la hendidura entre ellas. La Tabla 1 proporciona las diferentes características de los ensayos.

Tabla 1.- Características geométricas de las rejillas

Ensayo	Longitud, L	Ancho, B	Tipo de barra	Dirección de la barra	Espaciamiento, b_1	Coefficiente
[mm]	[m]	[m]	[mm]	(respecto a la corriente)	[mm]	$m = \frac{b_1}{b_1 + b_w}$
A	0,900	0,500	T 30/25/2	Longitudinal	5,70	0,16
B	0,900	0,500	T 30/25/2	Longitudinal	8,50	0,22
C	0,900	0,500	T 30/25/2	Longitudinal	11,70	0,28

Las rejillas se probaron con tres inclinaciones distintas (horizontal, e inclinaciones del 10% y del 20% hacia aguas abajo).

En cada prueba se midió el caudal entrante, q_1 , el caudal de descarga aguas abajo de la reja, q_2 , y el perfil longitudinal del flujo en la línea central del canal. De este modo, el caudal recogido en el

sistema de captación se obtiene como $q_d = q_1 - q_2$. La Tabla 2 proporciona los valores de q_1 ensayados en laboratorio.

Tabla 2.- Caudales de entrada en el modelo físico

Nº experimento	1	2	3	4	5
q_1 [l/s/m]	53,8	77,0	114,6	155,4	198,3

La Tabla 3 muestra las características del flujo al inicio del sistema de captación, donde e_0 es la energía específica del flujo y h_1 es el calado.

Tabla 3.- Caudales de entrada en el modelo físico

Tipo de reja	q_1 [l/s/m]	e_0 [cm]	h_1 [cm]	$\frac{h_1}{e_0}$
Reja A, B, C horizontal con flujo subcrítico en la entrada	53,8	9,98	6,66	0,667
	77,0	12,68	8,45	0,667
	114,6	16,53	11,02	0,667
	155,4	20,25	13,50	0,667
	198,3	23,82	15,88	0,667

MODELACIÓN NUMÉRICA

Los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*) permiten simular la interacción entre distintos fluidos, como es el caso de los flujos bifásicos agua-aire o agua con distintas densidades habituales en fenómenos de transporte de sedimentos, resolviendo los problemas de mecánica de fluidos dentro de cualquier configuración geométrica. Sin embargo, con el fin de probar la fiabilidad de estas herramientas en casos concretos, es necesario realizar una verificación con resultados experimentales afianzados.

Los programas de *CFD* simulan el flujo resolviendo numéricamente las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes en volúmenes de control de modo que se cumpla el balance de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad [2]$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad [3]$$

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad [4]$$

donde

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad [5]$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad [6]$$

siendo p la presión, ρ la densidad del fluido, U el vector velocidad, τ el tensor de tensiones turbulentas, h la energía, S_M el término de las fuerzas másicas, S_E el término fuente, λ la viscosidad volumétrica, μ la viscosidad dinámica y δ el delta de Kronecker.

Para obtener la solución en tiempos adecuados se emplean los denominados modelos de turbulencia, diseñados para caracterizar dichos efectos sin necesidad de resolver todas las escalas de turbulencia. De este modo el problema de clausura puede ser resuelto de forma eficiente.

Existen diversos modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad que van desde los modelos isotrópicos de dos ecuaciones como el clásico $k-\varepsilon$, hasta modelos de cierre de segundo

orden como el denominado modelo de tensiones de Reynolds (*RMS*). Los modelos de cierre de segundo orden resuelven independientemente cada componente de la velocidad turbulenta, pero tienen el inconveniente de su dificultad de convergencia. En este estudio se han empleado modelos de turbulencia de cierre de primer orden.

Para la resolución con *ANSYS CFX* se ha optado por el modelo de turbulencia "Shear Stress Transport", basado en el modelo *k- ω* . Este modelo fue diseñado para dar una elevada precisión del inicio y de la cantidad de flujo separado bajo gradientes de presión adversos, mediante la inclusión de los efectos de transporte en la formulación de la viscosidad de remolino, lo que se traduce en la mejor predicción de la separación del flujo. El rendimiento superior de este modelo ha sido demostrado en un gran número de estudios de validación (Bardina et al, 1997), por lo que está recomendado para las simulaciones de alta precisión de capa límite.

Por su parte, para la simulación con *FLOW 3D* se ha escogido el modelo *RNG k- ϵ* (Yakhot y Orszag, 1986; Yakhot y Smith, 1992) que constituye una mejora del modelo estándar *k- ϵ* . Este modelo se basa en un análisis grupal renormalizado de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para la resolución del fenómeno bifásico aire-agua, en *ANSYS CFX* se escogió el modelo homogéneo, mientras que en *FLOW 3D* se escogió la opción de un fluido, junto con los modelos físicos de entrada de aire.

Por simplicidad, se considera que en el sistema de captación todas las barras longitudinales trabajan de modo análogo, por lo que se puede considerar que se presentan condiciones de simetría en el plano central de las hendiduras que separan las barras longitudinales. De este modo, para el diseño del dominio fluido se han considerado estas condiciones, modelándose el comportamiento del flujo alrededor de una única barra del sistema de captación.

En el estudio de una reja de captación de fondo aparecen fenómenos de despegue del flujo y alta turbulencia que requieren elementos de mallado de gran calidad para su correcta resolución. La característica principal que diferencia a los distintos elementos es el número de nodos con el que resuelven las ecuaciones dentro de su volumen de control. A mayor número de nodos por elemento, más precisa será su resolución interna. Por este motivo se han empleado en ambos programas mallados con elementos hexaédricos.

El mallado usado en *ANSYS CFX* consta de un total de 109.262 elementos, siendo el tamaño de los mismos en las zonas de interés (inmediaciones de la reja) de 0,004 m y 0,008 m en el resto del modelo (Figura 3a). Para ajustarnos adecuadamente a la geometría del problema, en *FLOW 3D* se han empleado elementos con un tamaño de 0,002 m alrededor de las barras y 0,004 m en el resto del modelo, obteniéndose un total de 331.484 elementos (Figura 3b).

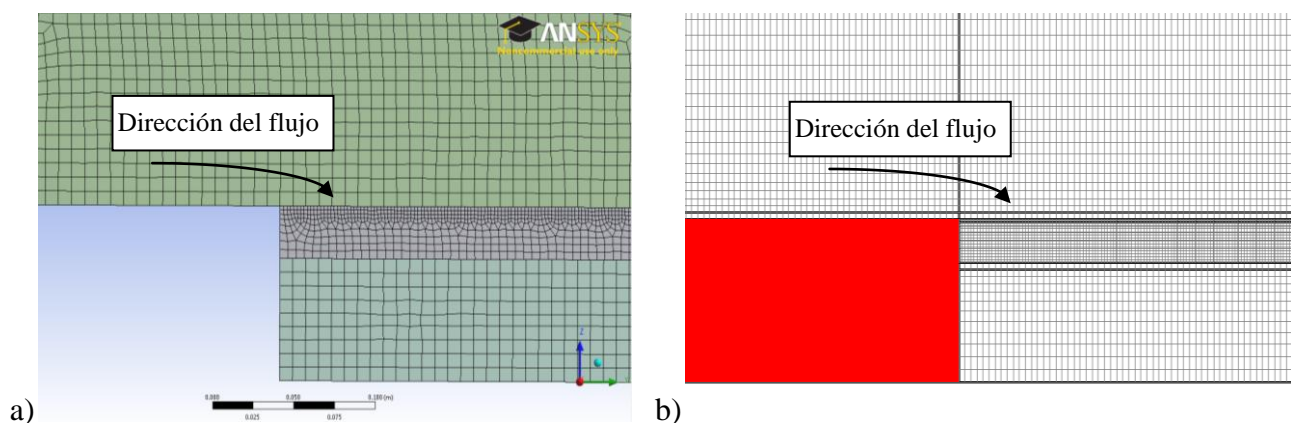


Figura 3.- Detalle del mallado del dominio fluido: a) *ANSYS CFX*, b) *FLOW 3D*

Las condiciones de contorno empleadas en las simulaciones corresponden a los calados en las secciones de entrada y salida del flujo y sus distribuciones de presiones hidrostáticas. En la salida situada bajo el sistema de rejillas se emplearon límites abiertos debido a que no se conoce de antemano el calado de flujo ni se cumple la condición de presión hidrostática.

Las simulaciones se han realizado en un equipo informático con 8 núcleos. En *ANSYS CFX* se realizó el estudio en régimen permanente. Empleando un intervalo de paso fijo de 0,05 segundos, el tiempo de resolución medio de las simulaciones fue de 1 hora 10 minutos. Por su parte, *FLOW 3D* no permite llevar a cabo simulaciones en régimen permanente, aunque permite emplear criterios de parada que finalizan la simulación cuando ésta llega al estado estacionario. La mayoría de las simulaciones se resolvió con un intervalo de paso en torno a 0,0002 segundos, obtenido en función de criterios de estabilidad internos, lo que requirió un tiempo de cálculo medio de 1 hora 20 minutos. Sin embargo, en algunas simulaciones se observó que, cuando se estaban alcanzando las condiciones estacionarias, el intervalo de paso disminuyó hasta 0,00002 segundos, alargando la resolución de la simulación hasta 11 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de conocer la fiabilidad de las simulaciones numéricas, se van a comparar los perfiles longitudinales del flujo obtenidos sobre el centro de la barra con los resultados obtenidos en laboratorio.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos para el caudal específico mayor y menor ensayados en laboratorio, considerando tres tipos de espaciamiento entre barras ($b_1 = 11,70$ mm, $m = 0,28$; $b_1 = 8,50$ mm, $m = 0,22$; $b_1 = 5,70$ mm, $m = 0,16$). Los perfiles de flujo han sido obtenidos con una fracción de volumen agua/aire de 0,50 en *ANSYS CFX* y, con la variable de superficie libre que resuelve *FLOW 3D*.

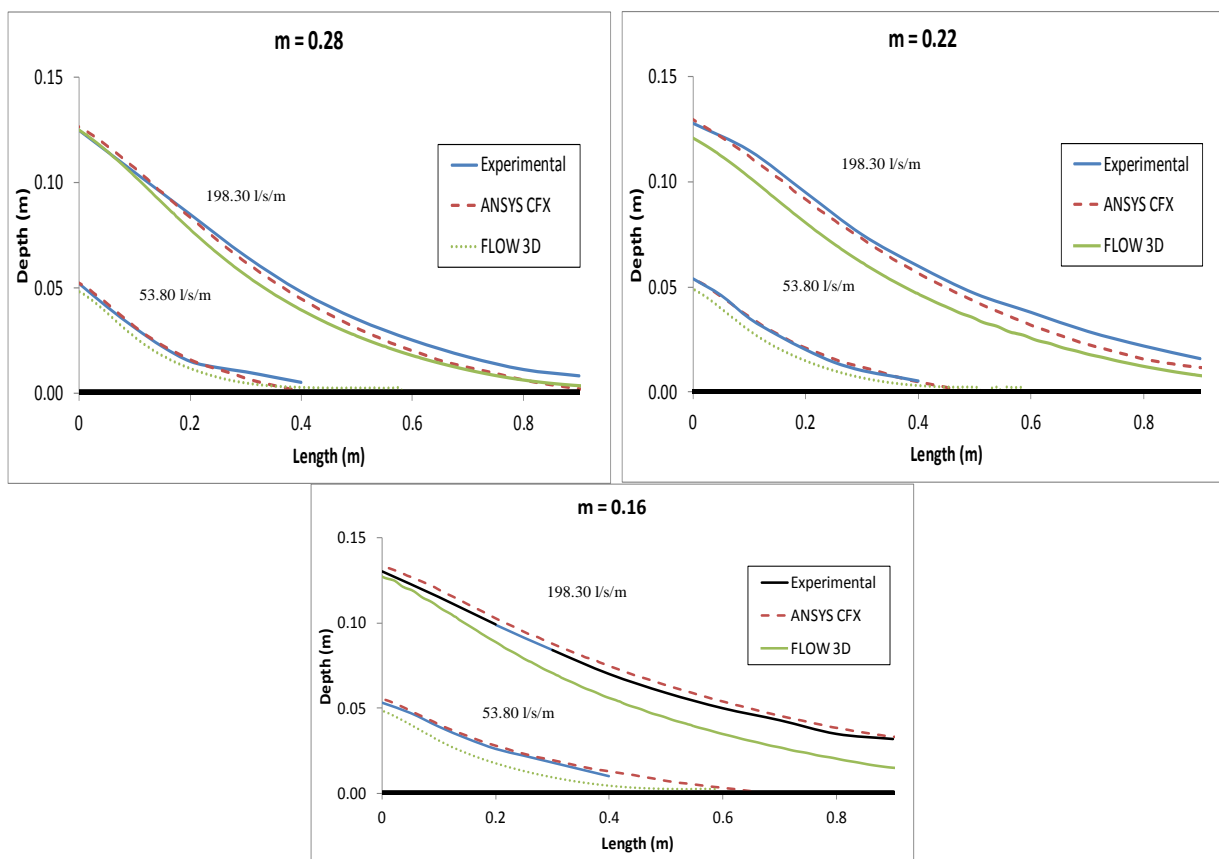


Figura 4.- Perfiles de flujo sobre el centro de la barra con la reja en posición horizontal en función del espaciamiento entre barras

En las figuras se observa que en general *ANSYS CFX* se ajusta mejor a la forma del perfil longitudinal de flujo observada en laboratorio.

Por su parte, *FLOW 3D* modela de modo adecuado los perfiles en las simulaciones realizadas con el mayor espaciamiento. Sin embargo, conforme el espaciamiento entre barras va

disminuyendo, *FLOW 3D* obtiene calados ligeramente inferiores a los otros dos métodos, situación que se va agravando conforme el flujo avanza sobre el sistema de captación. La máxima diferencia entre los perfiles corresponde al ensayo realizado con separación entre barras de 5,70 mm y caudal específico $q_1 = 198,30$ l/s/m, en el cual existe una diferencia en la parte final de la reja de 1,5 cm.

La Figura 5 muestra los caudales captados en el sistema de rejillas, en función del caudal de entrada al modelo, obtenidos tanto en laboratorio como con los programas, para cada uno de los tres espaciamientos considerados.

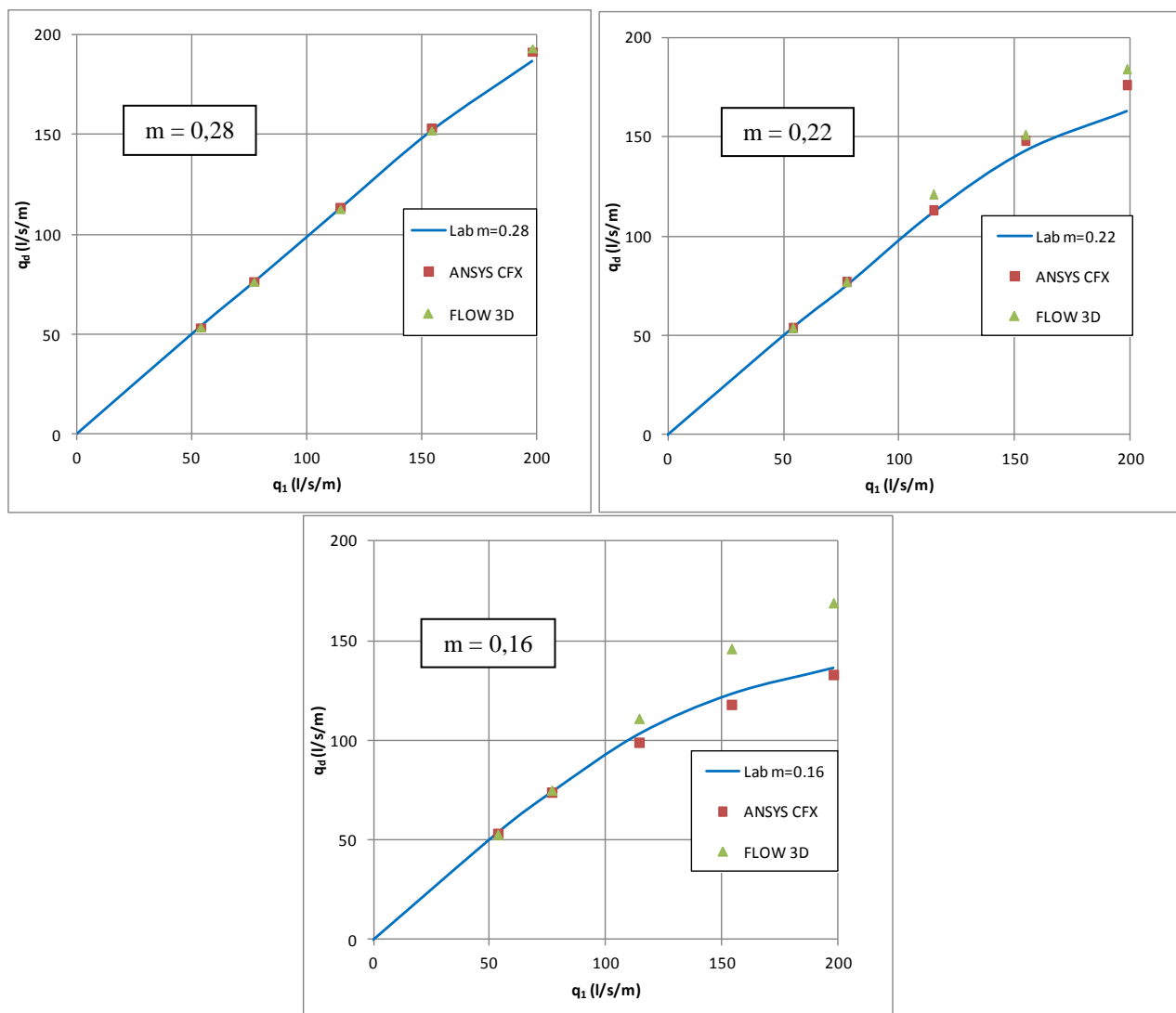


Figura 5.- Capacidad de derivación del sistema de captación con la reja en posición horizontal y diferentes espaciamientos

Se puede observar en los gráficos anteriores que para la mayor separación entre barras ambos programas obtienen una relación caudal de entrada - caudal captado muy similar a la observada en laboratorio. Con el espaciamiento intermedio, los dos programas reproducen muy bien la situación, salvo en el máximo caudal en el que consideran que el caudal captado en el sistema de rejillas es algo superior al observado en laboratorio. Al modelar caudales grandes con el espaciamiento inferior, *FLOW 3D* considera que el caudal captado es superior al obtenido con las otras dos metodologías, lo que concuerda con el descenso de calado en el perfil longitudinal observado en esta simulación.

Llevando a cabo un análisis cualitativo de las líneas de corriente que se producen al pasar el flujo sobre el sistema de captación, en la Figura 6 se pueden ver las semejanzas que existen entre las líneas de corriente obtenidas con luz láser por Righetti y Lanzoni (2008), con las calculadas mediante los programas *CFD*.

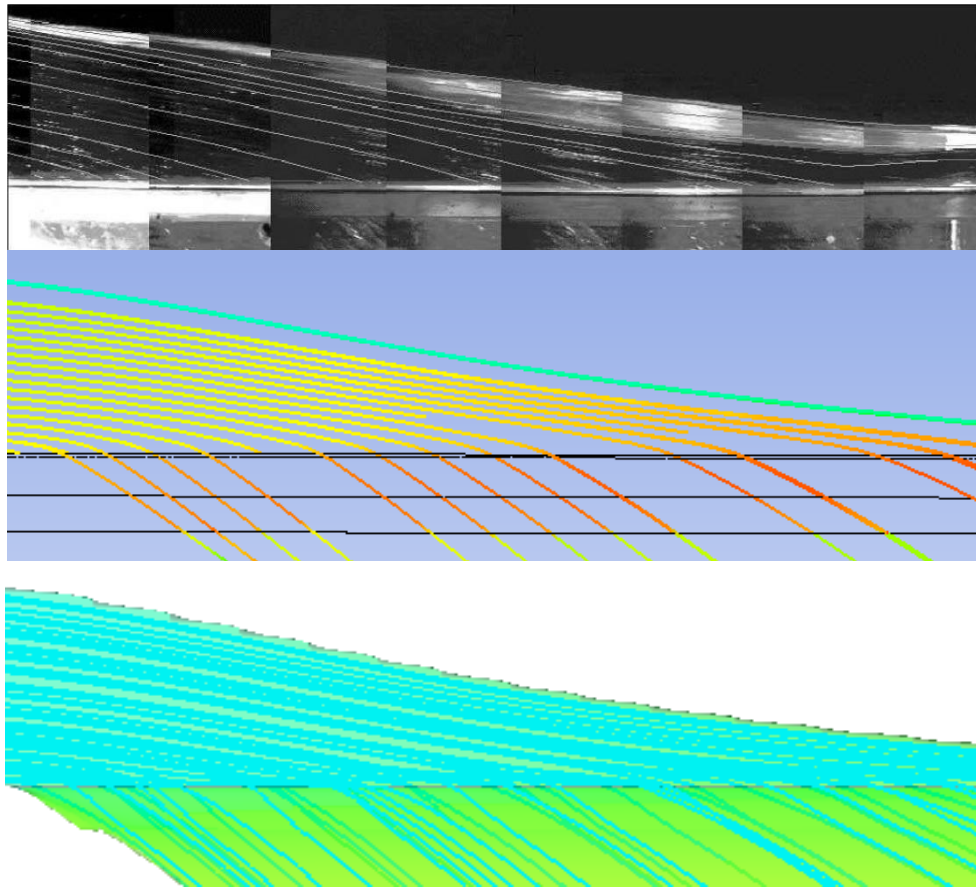


Figura 6.- Líneas de corriente sobre la reja. Arriba: foto con luz láser de Righetti y Lanzoni (2008). Centro: resultados obtenidos con ANSYS CFX. Abajo: resultado obtenido con FLOW 3D

A partir de los resultados obtenidos en laboratorio, Righetti et al. (2000) consideran que la variación del seno del ángulo del vector de la velocidad en el centro de las hendiduras, α , está comprendido entre 0.5 y 0.7, disminuyendo hacia aguas abajo conforme disminuye el calado.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas para los caudales específicos $q_1 = 198,30 \text{ l/s/m}$ y $q_1 = 53,80 \text{ l/s/m}$. Se observa que, pese a las diferencias en caudales y configuración del sistema de rejillas empleado, los valores obtenidos están en el rango de los observados en laboratorio, disminuyendo $\text{sen}(\alpha)$ a lo largo de la reja y confirmando su analogía con el coeficiente de descarga. Se aprecia también que los resultados obtenidos con FLOW 3D son más sensibles a la variación de $\text{sen}(\alpha)$. Por otro lado, no existen variaciones significativas entre los resultados obtenidos con los distintos espaciamientos.

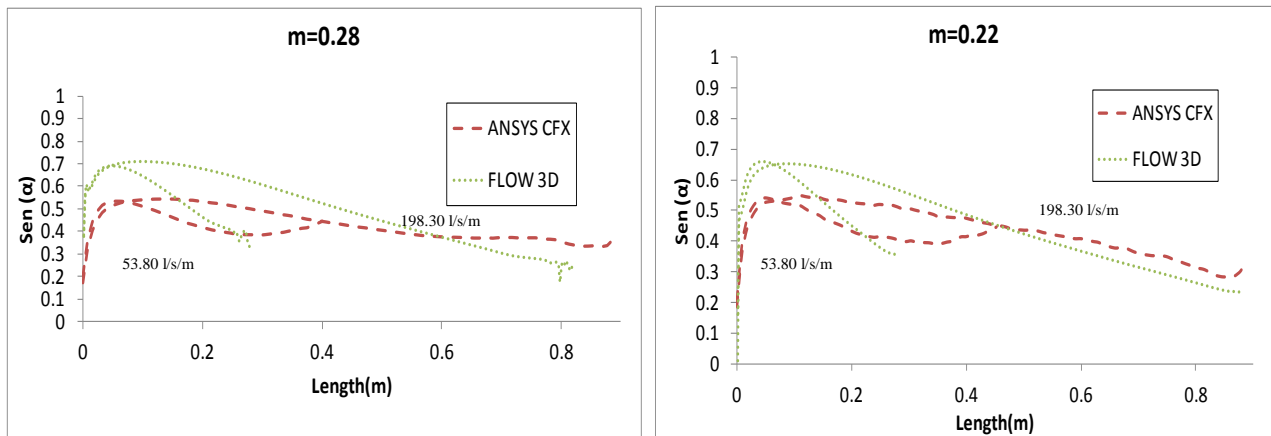


Figura 7.- Distribución de $\text{sen}(\alpha)$ en la hendidura entre dos barras adyacentes obtenidas en las simulaciones con CFD.

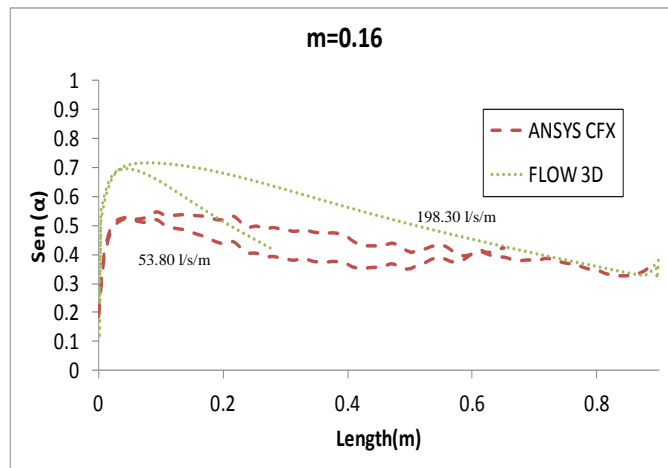


Figura 7.Cont.- Distribución de $\sin(\alpha)$ en la hendidura entre dos barras adyacentes obtenidas en las simulaciones con *CFD*.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado la fiabilidad de los resultados numéricos obtenidos en un sistema de captación con dos programas comerciales de *CFD*. Con estos resultados, podemos remarcar las siguientes ventajas que ofrece cada programa.

Ventajas de ANSYS CFX:

- Posibilidad de realizar un cálculo en régimen permanente.
- Se puede emplear un intervalo fijo de paso, por lo que se conoce de modo aproximado cuánto demorará la simulación.
- Permite emplear modelos de turbulencia basados en ω y de segundo orden.

Ventajas de FLOW 3D:

- Se puede ver la evolución de la resolución mientras resuelve.
- Criterio de parada cuando se alcanza el régimen permanente.
- Obtención más sencilla de la frontera que limita la lámina libre.

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede concluir que *ANSYS CFX* se ajusta un poco mejor a los resultados obtenidos en el laboratorio.

Sin embargo, para caracterizar correctamente el flujo sobre sistemas de captación se deben realizar más simulaciones apoyadas en modelos físicos y prototipos, caracterizando simultáneamente el fenómeno mediante la medición de calados, velocidades y concentraciones de sedimentos. De este modo podremos avanzar en la calibración de las herramientas informáticas.

FUTUROS TRABAJOS

Este trabajo ha consistido en el estudio del flujo de agua clara a su paso por el sistema de rejillas aplicando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional.

En el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena se ha construido una infraestructura (Figura 8) con el fin de mejorar el conocimiento de estos sistemas de captación.

Este dispositivo nos permitirá analizar la influencia de diferentes configuraciones de barras (forma, espaciado, inclinación) sobre el flujo de captación cuando se modelan diferentes concentraciones de sedimentos.

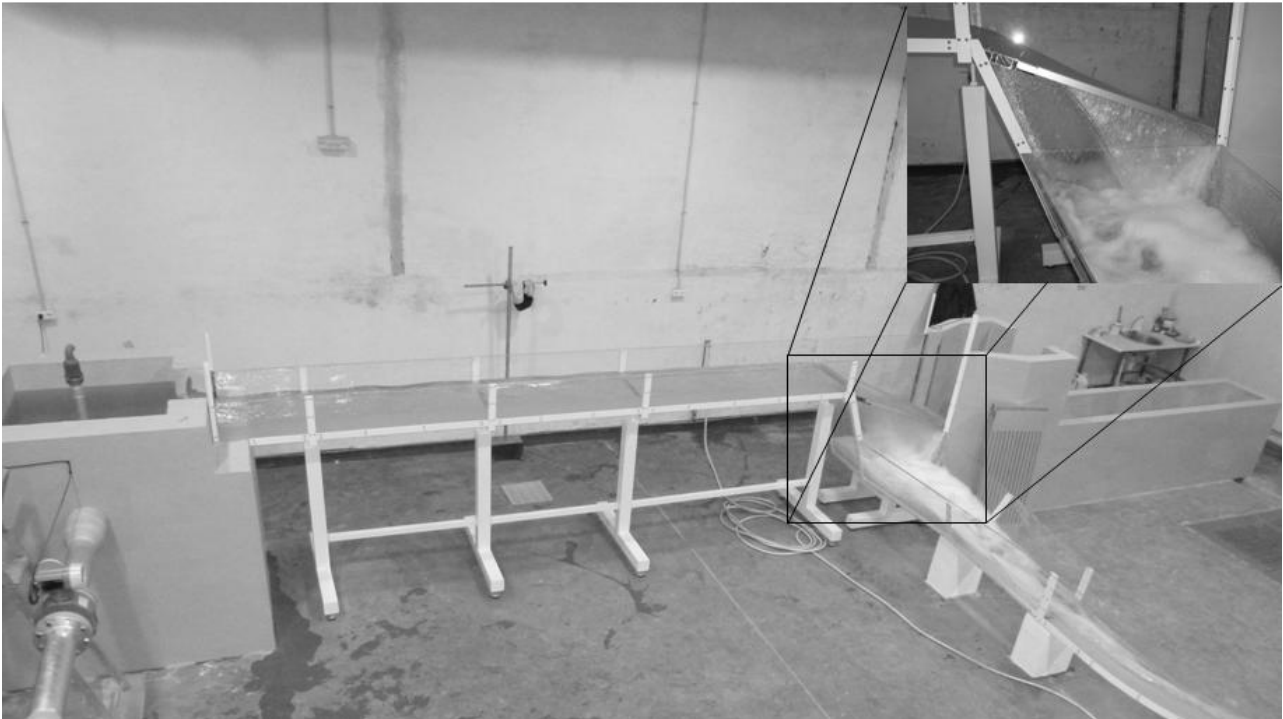


Figura 8.-Sistema de captación de fondo y detalle del flujo a través de la reja

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto PEPLAN: "Modelación Hidrológica en Regiones Semiáridas. Subproyecto 3: Modelación de captaciones en cauces efímeros". Los autores agradecen la financiación de la Consejería de Universidades, Empresa e Investigación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

- ANSYS CFX** (2010). ANSYS, Inc. *ANSYS CFX. Reference Guide. Release 13.0.*
- Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T.J.** (1997). "Turbulence Modeling Validation Testing and Development". *NASA Technical Memorandum 110446.*
- Brunella, S., Hager, W. and Minor, H.** (2003). "Hydraulics of Bottom Rack Intake". *Journal of Hydraulic Engineering/* January, USA: 4- 9.
- Castillo, L. y Lima, P.** (2010). "Análisis del dimensionamiento de la longitud de reja en una captación de fondo". *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.*
- FLOW 3D** (2011). FLOW Science, Inc. *FLOW 3D. Theory v10.0.*
- Nosedá, G.** (1956). "Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo". *L'Energia Elettrica*, pp. 565-581.
- Righetti, M., Rigon, R. and Lanzoni, S.** (2000). "Indagine sperimentale del deflusso attraverso una griglia di fondo a barre longitudinali". *Proc., XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Vol. 3, Genova, Italy, 112-119.*
- Righetti, M. and Lanzoni, S.** (2008). "Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks". *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE/ January 2008/pp. 15-22.
- Yakhot, V. and Orszag, S.A.** (1986). "Renormalization group analysis of turbulence". I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing, Volume 1, Number 1, pp. 3-51.*
- Yakhot, V. and Smith, L.M.** (1992). "The renormalization group, the ϵ -expansion and derivation of turbulence models". *Journal of Scientific Computing, Volume 7, Number 1, pp. 1.*