

# Calibración de dos programas CFD. Aplicación a aliviaderos de vertido libre

José María Carrillo Sánchez, Luis Gerardo Castillo Elsitdié  
Grupo de investigación Hidr@m - Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental  
Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas  
Paseo Alfonso XIII, N° 52, 30203 Cartagena (España)  
Teléfono: 968327012  
E-mail: jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es

**Resumen.** La disipación de energía en cuencos de amortiguación se produce principalmente por la turbulencia generada. En la caída del chorro y dentro del cuenco aparecen fenómenos de alta turbulencia y aireación que no pueden ser estudiados adecuadamente con las metodologías tradicionales. Por este motivo, y con el fin de comprender mejor el fenómeno observado en laboratorio, se realiza un estudio complementario con programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Estos programas, previa calibración con resultados de laboratorio, permiten simular la interacción entre diferentes fluidos como el fenómeno bifásico aire-agua que se origina en los aliviaderos de vertido libre. El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena cuenta con una infraestructura diseñada para el estudio de chorros turbulentos y cuencos de disipación de energía hidráulica cuyos datos nos permiten para calibrar y validar programas CFD.

## 1. Introducción

La principal ventaja de la metodología CFD es que permite resolver los problemas de mecánica de fluidos, proporcionando gran cantidad de resultados con mayor flexibilidad y velocidad que con los procedimientos experimentales. Sin embargo, para su correcto uso es necesario realizar una comparación y calibración previa con resultados obtenidos en modelos físicos y/o prototipos.

Al ser programas de volúmenes finitos, el dominio fluido del área de estudio queda dividido en volúmenes de control, en cada uno de los cuales se realiza el balance de las ecuaciones de Navier-Stokes que rigen el fenómeno en las tres direcciones.

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

En ANSYS CFX se empleó el modelo de turbulencia *Shear-Stress-Transport* basado en  $k-\omega$ . El elevado rendimiento de este modelo de turbulencia ha sido demostrado en numerosos estudios de validación (Bardina et al., 1997).

En FLOW 3D se aplicó el modelo  $k-\epsilon$ . Aunque el modelo de turbulencia basado en la renormalización del modelo  $k-\epsilon$  (RNG  $k-\epsilon$ ) es teóricamente más preciso que el modelo estándar, Wilcox (2006) concluye que el modelo  $k-\epsilon$  podría ser más preciso en el estudio de chorros planos.

Para la resolución del fenómeno bifásico aire-agua presente en los chorros turbulentos, en ANSYS CFX se escogió el modelo homogéneo, mientras que en

FLOW 3D se escogió la opción de un fluido, junto a modelos físicos relacionados con la aireación y esponjamiento de la frontera aire-agua.

Para el mallado en ANSYS CFX (Figura 1a), debido a que la alta turbulencia junto al despegue del flujo requieren una elevada precisión de cálculo, se optó por emplear elementos hexaédricos con un tamaño de 0.01 m en la zona de vuelo del chorro y alrededor del punto de estancamiento. Además, se ha comprobado que dichos elementos mejoran la convergencia de la solución (Carrillo y Castillo, 2011).

En FLOW 3D se empleó un mallado de elementos hexaédricos con 0.005 m en la zona de vuelo del chorro y 0.01 m en la zona del colchón de agua (Figura 1b).

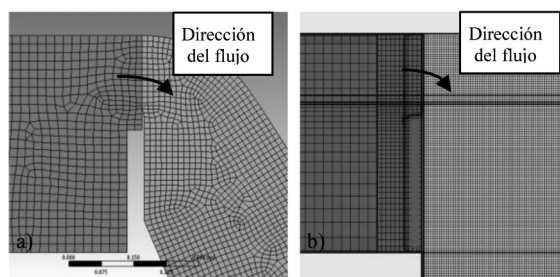


Figura 1. Detalle del mallado del dominio fluido en la zona del vertedero: a) ANSYS CFX, b) FLOW 3D

Las condiciones de contorno corresponden a los calados en las secciones de entrada y salida del flujo y sus distribuciones de presiones hidrostáticas. En la sección de entrada se consideró una turbulencia  $T_{u,x}$  del 16%, correspondiente a la obtenida en laboratorio con velocímetros de metodología Doppler.

En todos los escenarios, se ha realizado un cálculo en régimen transitorio de 60 segundos, de modo que a partir de los 20 segundos se puede considerar que se

han alcanzado las condiciones permanentes. Los datos se tomaron cada 0.05 s, que corresponde a la frecuencia de muestreo empleada en laboratorio para registrar las presiones en la solera del cuenco.

En *ANSYS CFX* se ha utilizado un intervalo de paso de 0.05 s, mientras que en *FLOW 3D* se ha considerado un intervalo fijo de 0.0001 s con el fin de evitar que el programa emplee intervalos de paso inferiores cuando se alcanzan las condiciones permanentes.

El tiempo medio de cálculo en un ordenador de 8 núcleos en *ANSYS CFX* fue de 4.099e+05 s ( $\approx 5$  días), mientras que en *FLOW 3D* se requieren 1.073e+06 s ( $\approx 12$  días).

Para la obtención de la lámina libre tanto en el chorro rectangular como en el cuenco de disipación se ha considerado un valor de fracción volumétrica de agua de 0.50. La Figura 2 muestra las superficies libres obtenidas con los programas *CFD* una vez se han alcanzado las condiciones permanentes.

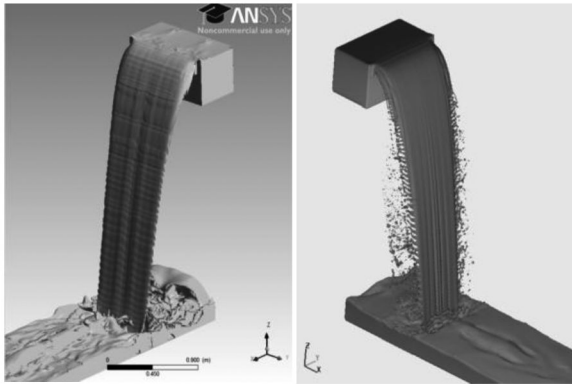


Figura 2. Lámina libre del chorro obtenida con *ANSYS CFX* y *FLOW 3D* ( $q = 0,058 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $T_{u,x} = 0,16$ ,  $H = 2,27 \text{ m}$ ,  $h = 0,087 \text{ m}$ ,  $Y = 0,17 \text{ m}$ )

## 2. Resultados y discusión

Partiendo del modelo físico ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT, en este trabajo se presenta la comparativa de los resultados de laboratorio con los obtenidos en las simulaciones numéricas realizadas con los programas comerciales *ANSYS CFX* (versión 12.1) y *FLOW 3D* (versión 10.0), aplicados al estudio de chorros altamente turbulentos y aireados y cuencos de disipación. Los resultados se comparan también con la Metodología Paramétrica propuesta por Castillo (2006) para la evaluación de acciones hidrodinámicas a pie de presa, revisada por Castillo y Carrillo (2011).

Para realizar la comparación se consideran la sección del vertedero  $S_1$ , la condición inicial  $S_2$  (situada a la cota  $z = -h$ ), la condición incidente del chorro  $S_3$  y el impacto con la solera  $S_4$  (Fig. 3).

Las variables a considerar son:

- $H$  Diferencia entre la cota de lámina libre aguas arriba del aliviadero y en el cuenco
- $h$  Carga sobre vertedero
- $y_b$  Calado del flujo a su paso sobre el labio del aliviadero

- $V_0$  Velocidad del flujo a su paso sobre el labio del aliviadero
- $V_i$  Velocidad en la condición inicial
- $B_i$  Ancho del chorro en la condición inicial
- $V_j$  Velocidad incidente
- $B_j$  Ancho del chorro incidente
- $L_b$  Longitud de rotura del chorro
- $X_{imp}$  Distancia horizontal del aliviadero al punto de impacto
- $H_m$  Presión media del registro obtenido en el punto de estancamiento
- $Y_u$  Calado en el cuenco de disipación aguas arriba del impacto
- $Y$  Calado en el cuenco de disipación aguas abajo del impacto
- $\theta$  Ángulo de incidencia del chorro
- $C_p$  Coeficiente de presión dinámica media:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g}$$

siendo

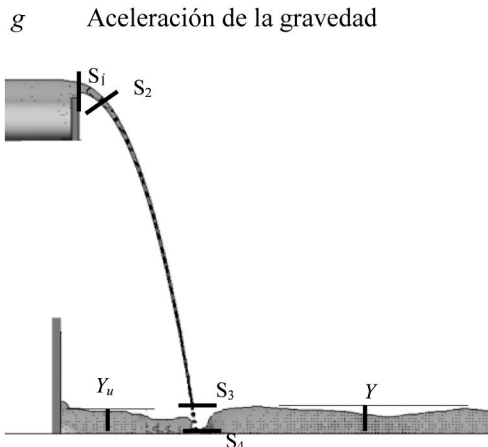


Figura 3. Descripción de las secciones a considerar

En la Tabla 1 se recogen los resultados obtenidos en las principales variables que intervienen en el fenómeno de chorros turbulentos.

Tabla 1: Comparación de variables que intervienen en el fenómeno de chorros turbulentos ( $q=0.058 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $T_{u,x} = 0.16$ ,  $H = 2.27 \text{ m}$ ,  $h = 0.087 \text{ m}$ ,  $Y = 0.17 \text{ m}$ )

	ANSYS CFX	FLOW 3D	Lab.	Param.
$h$ (m)	0.089	0.087	0.087	0.087
$y_b$ (m)	0.078	0.072	0.082	0.083
$V_0$ (m/s)	0.77	0.83	-	0.76
$V_i$ (m/s)	1.78	1.87	-	1.54
$B_i$ (m)	0.048	0.034	-	0.053
$V_j$ (m/s)	6.32	6.76	-	6.59
$B_j$ (m)	0.022	0.012	-	0.025
$L_b$ (m)	$> H$	$> H$	-	3.12
$X_{imp}$ (m)	0.75	0.70	0.74	0.73
$H_m$ (m.c.a.)	0.92	0.86	0.85	1.10
$Y_u$ (m)	0.12	0.18	0.16	0.17
$Y$ (m)	0.16	0.17	0.17	0.17
$\theta$ ( $^\circ$ )	82.75	82.18	-	81.58
$C_p$	0.37	0.30	0.34	0.41



En la tabla anterior se observa que con los 4 métodos se obtienen resultados muy similares. En todos los casos se tienen condiciones de colchón efectivo ( $Y > 4B_j$ ) y el chorro todavía mantiene un núcleo de agua compacto antes del impacto ya que no existe distancia suficiente de caída para que se produzca la disgregación total del chorro ( $H < L_b$ ).

En general las velocidades obtenidas con *FLOW 3D* son superiores a las obtenidas con *ANSYS CFX* (y por tanto menores los espesores del chorro). En *FLOW 3D* se observa que  $V_j$  es similar a la velocidad de caída libre sin tener en cuenta las pérdidas por rozamiento. Sin embargo, *FLOW 3D* obtiene una distancia al impacto  $X_{imp}$  inferior a *ANSYS CFX* y a la observada en laboratorio.

Por otro lado, los resultados del colchón aguas arriba del impacto del chorro  $Y_u$  con *ANSYS CFX* no son muy acertados, debido a que la alta tasa de aireación en esta zona, dificulta la obtención de la lámina libre.

Finalmente, el coeficiente de presión dinámica media obtenido con el Método Paramétrico es mayor que los otros debido a que esta formulación fue obtenida a partir de las envolventes de presiones medidas en laboratorio, quedando del lado de la seguridad, y siendo recomendado su uso hasta una turbulencia del 5% aguas arriba de la zona de vertido.

La Figura 4 compara la distribución de presiones obtenidas en el punto de estancamiento, cuando en las simulaciones se han alcanzado las condiciones de régimen permanente. *FLOW 3D* muestra una distribución similar a la observada en laboratorio. Sin embargo, los resultados de *ANSYS CFX* están más acotados y próximos al valor medio de los otros registros de presiones, debido posiblemente al tipo de promediado temporal del modelo de turbulencia *RANS* que *ANSYS CFX* realiza.

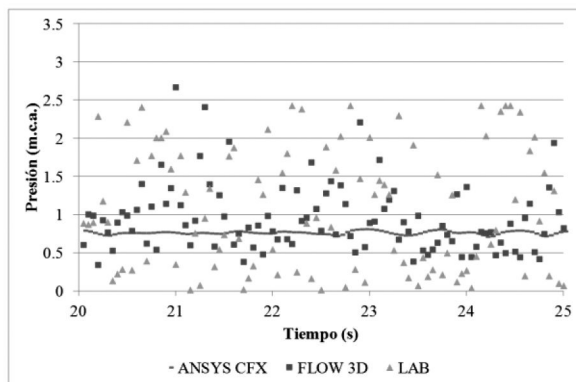


Figura 4. Distribución de presiones en el punto de estancamiento ( $q = 0,058 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $T_{ur} = 0.16$ ,  $H = 2,27 \text{ m}$ ,  $h = 0,087 \text{ m}$ ,  $Y = 0,17 \text{ m}$ )

### 3. Conclusiones

Con el fin de mejorar el diseño de las estructuras de disipación y avanzar en el conocimiento de los chorros turbulentos, es necesario realizar más estudios experimentales, tanto en modelos como en prototipos, caracterizando simultáneamente el fenómeno de aireación del chorro junto a medidas de presión, velocidades y tasas de aireación.

Tras comparar los dos programas *CFD*, se puede decir que:

- *FLOW 3D* no es muy preciso en las inmediaciones de los puntos de estancamiento. Por otro lado, cada simulación requiere un tiempo de resolución mayor al requerido en *ANSYS CFX* y una capacidad de disco duro de aproximadamente 100 GB.
- *ANSYS CFX* obtiene un registro de presión promediado que contrasta con la variabilidad natural del fenómeno. Por otro lado, cuando la entrada de aire es muy elevada, la obtención de la lámina libre resulta bastante complicada.

### Referencias

- [1] ANSYS CFX (2010). ANSYS CFX. Reference Guide. Release 13.0.
- [2] Bardina, J.E., Huang, P.G. & Coakley, T.J. (1997). "Turbulence Modeling Validation Testing and Development". NASA Technical Mem. 110446.
- [3] Carrillo, J.M., Castillo, L.G. (2011). "Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional". IV Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT, Cartagena, España.
- [4] Carrillo, J.M., Castillo, L.G. (2011). "Simulación de flujos bifásicos con metodología CFD y contrastación de resultados con medidas de laboratorio". II Jornadas de Ingeniería del Agua, Barcelona, España.
- [5] Castillo, L.G. (2006). "Areated jets and pressure fluctuation in plunge pools". The 7<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience and Engineering. September, Philadelphia, USA.
- [6] Castillo, L., Puertas, J., Dolz, J. (2007). "Discussion about Scour of Rock due to the impact of plunging high velocity jets". Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 6, pp. 715-723.
- [7] Castillo, L.G., Carrillo, J.M. (2011). "Numerical simulation and validation of hydrodynamics actions in energy dissipation devices". World Congress International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Brisbane, Australia.
- [8] FLOW 3D (2011). FLOW Science, Inc. FLOW 3D. Theory v10.0.
- [9] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Nithiarasu, P. (2005). "The Finite Element Method for Fluid Dynamics", Elsevier Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-6322-7.
- [10] Wilcox, D.C. (2006). "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries, Inc., ISBN 978-1-928729-08-2.