

Influencia de la escala en simulaciones numéricas de aliviaderos de vertido libre. Proyecto EMULSIONA

L. G. Castillo Elsitdié¹, J. M. Carrillo Sánchez¹

¹Grupo de I+D+i Hidr@m. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena

1. Introducción

Los chorros rectangulares o planos constituyen uno de las formas de desbordamiento más habitual en presas de hormigón. Esto plantea a menudo problemas de erosión potencial y socavación a pie de presa. Para evaluar la necesidad de protección de estas áreas, se necesita una comparación de la energía hidráulica potencial y de la resistencia a la erosión de los materiales (Annandale, 2006).

La caracterización de presiones en cuencos de disipación se ha analizado utilizando diferentes modelos a escala: Moore (1943), Lencastre (1961), Ervine y Falvey (1987), Ervine et al. (1997), Bollaert y Schleiss (2003), Manso et al. (2005) y Federspiel (2011), entre otros.

En España esta línea de investigación ha sido analizada por Castillo (1989, 1998, 2002, 2006, 2007, 2009), Armengou (1991), Puertas (1994) y Castillo et al. (1991, 1999, 2011, 2013).

El principal mecanismo de disipación de la energía es la difusión del chorro en el vuelo (aireación y atomización), el arrastre de aire cuando el chorro entra en el cuenco, la difusión en el cuenco y, finalmente, el impacto con la solera. Para el diseño se define tanto las condiciones iniciales e incidentes.

Las condiciones iniciales, que se encuentran a la salida de la estructura del aliviadero, se definen por la velocidad media $V_i = (2gh_0)^{1/2}$, donde h_0 es aproximadamente igual a dos veces la carga sobre vertedero, h .

Las condiciones incidentes se definen en la entrada del chorro al cuenco. Se considera la velocidad media, V_j , y el espesor de chorro incidente, B_j .

La longitud de rotura del chorro, L_b , indica la distancia a partir de la cual el chorro está completamente desarrollado, consistiendo en gotas de agua que se van desintegrando cada vez en gotas más finas.

Para el caso de chorros rectangulares, Castillo (2006, 2007) propuso algunos estimadores de la intensidad de turbulencia en la condición inicial T_u^* , la longitud de rotura L_b , la distancia

de expansión lateral del chorro ξ , el ancho del chorro incidente B_j , y el coeficiente de presión dinámica media C_p . La Tabla 1 resume estas formulaciones, junto con la trayectoria del chorro ($y = f(x)$) y el calado en el cuenco bajo el chorro Y_u .

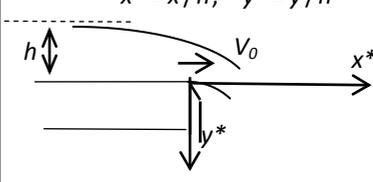
AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES																														
Castillo (2006) y nuevos ajustes propuestos	Condiciones iniciales: $T_u^* = q^{0.43} / IC$ $IC = 14.95g^{0.50} / (K^{1.22} C_d^{0.19})$ $\frac{L_b}{B_j F_i^2} = \frac{K}{(k T_u^* F_i^2)^{0.82}}$	T_u^* , Intensidad turbulenta en la condición inicial ($q < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$) q , Caudal específico IC , Condiciones iniciales g , Aceleración de la gravedad K , Coeficiente adimensional (≈ 0.85) C_d , Coeficiente de descarga L_b , Longitud de rotura del chorro. Para $q < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$, $L_b \approx 6q^{0.32}$ (Horeni)																														
	Condiciones incidentes: $\xi = 2 \sqrt{h} [\sqrt{2H} \quad 2\sqrt{h}]$ $B_j = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4 \sqrt{h} [\sqrt{2H} \quad 2\sqrt{h}]$	B_j , Espesor del chorro en la condición inicial F_i , Número de Froude en la condición inicial B_j , Espesor del chorro en la condición incidente																														
Scimemi (1930)	Coeficiente de presión dinámica media (C_p): Colchón no eficaz, $Y/B_j \leq 5.5$: Si $H/L_b \leq 1.05$ $C_p = 1 - 0.4089(H/L_b)^{4.7958}$ Si $H/L_b > 1.05$ $C_p = 0.6088(H/L_b)^{-3.803}$	H , Diferencia de altura entre la lámina de aguas arriba y la lámina de aguas abajo $\varphi = k_p T_u^*$ $= 1.24 T_u^*$ $h_0 \approx 2h$, Nivel de las condiciones iniciales																														
	Colchón eficaz, $Y/B_j > 5.5$: $C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g} = a e^{-0.20(Y/B_j)}$	H_m , Presión media en el punto de estancamiento Y , Calado en el cuenco V_j , Velocidad incidente																														
	Trayectoria del chorro central: $x^* = [2.155(y^* + 1)^{1/2.33} - 1]$ $x^* = x/h; \quad y^* = y/h$ 	x, y , Ejes coordenados h , Carga sobre vertedero $V_0 = \alpha V = \alpha(q/y_b)$, Velocidad inicial en la cresta del vertedero α , Coeficiente de Coriolis																														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>H/L_b</th> <th>a</th> <th>C_p ($Y/B_j \leq 5.5$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 0.85</td> <td>2.50</td> <td>0.832</td> </tr> <tr> <td>0.85-0.89</td> <td>2.35</td> <td>0.782</td> </tr> <tr> <td>0.90-0.99</td> <td>1.94</td> <td>0.646</td> </tr> <tr> <td>1.00-1.09</td> <td>1.54</td> <td>0.513</td> </tr> <tr> <td>1.10-1.24</td> <td>1.15</td> <td>0.383</td> </tr> <tr> <td>1.25-1.29</td> <td>0.85</td> <td>0.283</td> </tr> <tr> <td>1.30-1.39</td> <td>0.55</td> <td>0.183</td> </tr> <tr> <td>1.40-1.60</td> <td>0.35</td> <td>0.117</td> </tr> <tr> <td>> 1.60</td> <td>0.24</td> <td>0.080</td> </tr> </tbody> </table>	H/L_b	a	C_p ($Y/B_j \leq 5.5$)	< 0.85	2.50	0.832	0.85-0.89	2.35	0.782	0.90-0.99	1.94	0.646	1.00-1.09	1.54	0.513	1.10-1.24	1.15	0.383	1.25-1.29	0.85	0.283	1.30-1.39	0.55	0.183	1.40-1.60	0.35	0.117	> 1.60	0.24	0.080
H/L_b	a	C_p ($Y/B_j \leq 5.5$)																														
< 0.85	2.50	0.832																														
0.85-0.89	2.35	0.782																														
0.90-0.99	1.94	0.646																														
1.00-1.09	1.54	0.513																														
1.10-1.24	1.15	0.383																														
1.25-1.29	0.85	0.283																														
1.30-1.39	0.55	0.183																														
1.40-1.60	0.35	0.117																														
> 1.60	0.24	0.080																														

Tabla 1. Formulaciones de la metodología Paramétrico de chorros rectangulares.

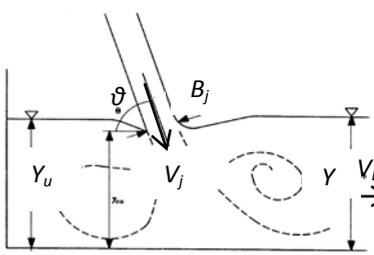
AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Cui Guang Tao et al. (1985), Castillo (1989)	<p>Calado bajo el chorro:</p> $Y_u / Y = \sqrt{1 - 2F_D [(V_j / V_D) \beta \cos \vartheta - 1]}$ 	<p>Y_u, Calado bajo el chorro</p> <p>$F_D = V_D^2 / (gY)$, Cuadrado del número de Froude</p> <p>V_D, Velocidad en el cuenco aguas abajo</p> <p>$\beta_D = 1 - \beta$, Coeficiente de pérdidas de energía</p> <p>$\beta_D \approx 0.40$ Chorro 2D</p> <p>$\beta_D \approx 0.45$ Chorro 3D</p> <p>θ, Ángulo de incidencia del chorro</p>

Tabla 1-cont. Formulaciones de la metodología Paramétrico de chorros rectangulares.

2. Infraestructura de laboratorio

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena cuenta con una infraestructura para el estudio de chorros turbulentos bifásicos aire-agua.

Un mecanismo móvil permite variar la altura de vertido entre 1.70 y 4.00 m. El cuenco de disipación (1.60 m de altura y 1.05 m de ancho) permite disponer diferentes colchones de agua. Se están realizando mediciones de presión instantáneas con transductores piezorresistivos ubicados en la solera del cuenco, velocidades instantáneas con equipos ADV, y velocidades medias y las tasas de aireación con equipos de fibra óptica.

3. Modelos a escala

Las mediciones de laboratorio se han llevado a cabo en una infraestructura de tamaño relativamente pequeño. Con el fin de que los resultados del modelo físico puedan ser considerados como representativos, se tienen que satisfacer unas leyes de similitud.

En vertidos de caída libre, los autores consideran que algunas fuerzas tienen efectos secundarios. En este sentido, la compresibilidad del agua no suele tenerse en cuenta. Asimismo, la viscosidad tiende a ser despreciada debido a que la turbulencia es suficientemente elevada para no considerar esfuerzos viscosos.

En lo referente a la aireación, existe un importante efecto de escala difícil de resolver. Es necesario aceptar que las presiones en modelo será más grande que en prototipos. De esta manera, un experimento que no considera la aireación estará del lado de la seguridad.

Aceptando que la aireación es un efecto de escala que no podemos resolver, se ha utilizado la ley de semejanza de Froude. Se han considerado las siguientes relaciones de escala: 1:1; 1:10; 1:20 y 1:40.

4. Simulación numérica

Mediante el programa ANSYS CFX v12.1 (2009) se ha realizado el análisis numérico de los chorros planos y en cuenco de disipación. Este programa, basado en el esquema de volúmenes finitos, resuelve las ecuaciones en volúmenes de control definido por el mallado del dominio de fluido. Para complementar la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promediado de Reynolds (RANS), se ha utilizado el modelo de turbulencia SST.

Se ha considerado un intervalo de paso de 0.05 s, correspondiente a frecuencia de muestreo en laboratorio. Las condiciones permanentes se alcanzan después de 20 segundos de simulación en el modelo a escala de laboratorio.

A escala de modelo se han considerado elementos de mallado hexaédricos de 0.01 m. Para las simulaciones de los tamaños a escala, el tamaño de los elementos se ha modificado de acuerdo con el correspondiente factor de escala k_f .

Para la obtención de la superficie libre en el chorro y en el cuenco de amortiguamiento se ha considerado una proporción de 0.8 de la fracción de volumen de aire.

5. Resultados y discusión

Las Tablas 2 a 3 comparan los resultados de las tres metodologías (simulación CFD, resultados de laboratorio escalados y Metodología Paramétrica), con diferentes colchones.

Variable	Factor de escala											
	1:1			1:10			1:20			1:40		
	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param
L_b (m)	> H	-	2.32	> H	-	23.24	> H	-	46.49	> H	-	92.98
H_m (m)	1.13	1.26	1.27	11.14	12.60	12.66	21.62	25.20	25.32	43.67	50.40	50.65
C_p	0.46	0.51	0.51	0.45	0.51	0.51	0.44	0.51	0.51	0.44	0.51	0.51

Tabla 2. Comparación de las principales variables medidas y calculadas ($q = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$, $H = 2.41 \text{ m}$, $h = 0.91 \text{ m}$, $Y = 0.03 \text{ m}$ a escala de laboratorio).

Variable	Factor de escala											
	1:1			1:10			1:20			1:40		
	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param
L_b (m)	> H	-	2.32	> H	-	23.24	> H	-	46.49	> H	-	92.98
H_m (m)	1.07	1.15	1.20	10.89	11.50	11.38	21.86	23.00	22.77	42.12	46.00	45.53
C_p	0.40	0.43	0.46	0.41	0.43	0.43	0.41	0.43	0.43	0.39	0.43	0.43

Tabla 3. Comparación de las principales variables medidas y calculadas ($q = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$, $H = 2.28 \text{ m}$, $h = 0.91 \text{ m}$, $Y = 0.17 \text{ m}$ a escala de laboratorio).

Variable	Factor de escala											
	1:1			1:10			1:20			1:40		
	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param
L_b (m)	> H	-	2.32	> H	-	23.24	> H	-	46.49	> H	-	92.98
H_m (m)	0.88	0.73	0.72	9.51	7.30	6.72	18.90	14.60	13.44	37.94	29.20	26.87
C_p	0.29	0.22	0.21	0.32	0.22	0.19	0.32	0.22	0.19	0.32	0.22	0.19

Tabla 4. Comparación de las principales variables medidas y calculadas ($q = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$, $H = 2.19 \text{ m}$, $h = 0.91 \text{ m}$, $Y = 0.25 \text{ m}$ a escala de laboratorio).

Variable	Factor de escala											
	1:1			1:10			1:20			1:40		
	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param	CFD	Lab	Param
L_b (m)	> H	-	2.32	> H	-	23.24	> H	-	46.49	> H	-	92.98
H_m (m)	0.56	0.55	0.56	5.70	5.50	5.37	11.13	11.00	10.75	22.51	22.00	21.50
C_p	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09

Tabla 5. Comparación de las principales variables medidas y calculadas ($q = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$, $H = 2.11 \text{ m}$, $h = 0.91 \text{ m}$, $Y = 0.35 \text{ m}$ a escala de laboratorio).

La longitud de rotura del chorro, L_b , no queda bien definida con simulaciones CFD. El enfoque Euleriano-Euleriano utilizado no simula decuadamente la desintegración del chorro en gotas de agua. Este resultado coincide con los estudios de Ho y Riddette (2010), los cuales consideran un progreso limitado hasta la fecha debido a que L_b requiere una resolución de mallado muy fina.

C_p es un parámetro adimensional. Por esta razón, las diferentes escalas de laboratorio no hacen ningún efecto en él. ANSYS CFX tiende a escalar todos los parámetros cumpliendo la ley semejanza, debido a que el tamaño del mallado se ha obtenido con la misma similitud de Froude. La metodología paramétrica muestra valores similares en la presión media en el punto de estancamiento, H_m , así como en el coeficiente de presión dinámica media, C_p .

Las figuras 1 a 4 muestran la velocidad del chorro en la condición incidente V_j , el coeficiente de presión dinámica media C_p , la distancia horizontal al punto de estancamiento X_{imp} y el calado de agua bajo el chorro Y_u , cuando se consideran diferentes escalas. Estos valores se clasifican como resultados simulados (CFD), mediciones de laboratorio (LAB), Metodología Paramétrica (Param), y los resultados del escalado del modelo de laboratorio (LAB scaled).

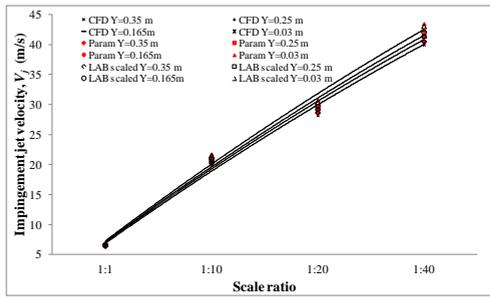


Figura 1. Velocidad en la sección incidente, V_j .

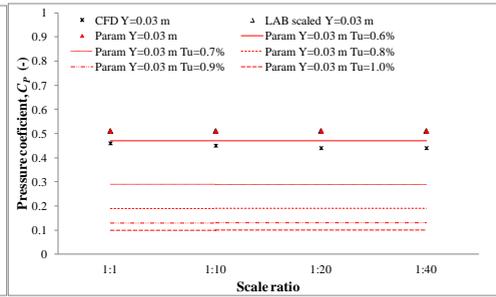


Figura 2. Coeficiente de presión C_p . Caso $Y/B_j=1.30$.

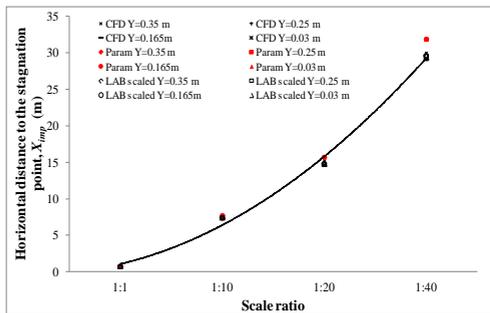


Figura 3. Distancia horizontal al punto de estancamiento, X_{imp} .

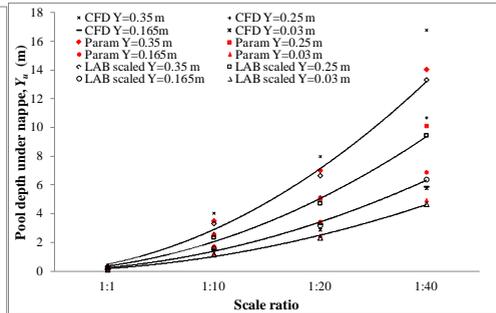


Figura 4. Calado bajo el chorro, Y_u .

Para la velocidad incidente del chorro, la Metodología Paramétrica considera la velocidad de caída libre sin tener en cuenta la interacción con el aire. Las mediciones de laboratorio se han obtenido con un equipo de fibra óptica, por lo que la velocidad es un poco más baja. Las velocidades con CFD tienden a ser un poco más pequeñas que las mediciones de laboratorio.

La Figura 2 muestra los valores C_p obtenidos en el caso de impacto directo ($Y/B_j = 1.30$). Los valores de CFD son algo menores que los obtenidos en el escalado del resultado de laboratorio, y con la Metodología Paramétrica. Por otro lado, se puede observar que la turbulencia en la condición inicial tiene un gran efecto en los resultados de la Metodología Paramétrica. En función de su valor real en prototipo, las diferencias pueden ser muy importante: si $T_u = 0.6\%$ se obtiene un $C_p = 0.47$, pero si $T_u = 1.0\%$ se tiene $C_p = 0.10$.

La figura 3 muestra que la Metodología Paramétrica obtiene distancias hasta el punto estancamiento X_{imp} ligeramente superiores, mientras que CFD obtiene valores cercanos a los resultados escalados de laboratorio. Estos resultados concuerdan con los valores de V_j .

Finalmente, la figura 4 muestra el calado de agua bajo el chorro. Debido a la gran mezcla aire-agua que aparecen en esta región, Es muy difícil estimar Y_u a partir de las simulaciones numéricas, razón por la cual los valores de CFD están más dispersos.

6. Conclusiones

En este estudio se comparan los resultados obtenidos en chorros rectangulares de caída libre utilizando tres metodologías (laboratorio, Metodología Paramétrica y simulaciones CFD) cuando se consideran diferentes factores de escala.

La metodología paramétrica utilizada en este trabajo se basa sólo en los resultados de mediciones de presiones instantáneas en la solera del cuenco amortiguador. La formulación del coeficiente de presión dinámica media se ha mejorado para este trabajo, a partir de nuevos estudios experimentales de presiones y velocidades que complementan los estudios anteriores.

Los resultados de laboratorio nos permiten validar los programas de CFD. Estos programas requieren un mallado muy fino para caracterizar la rotura del chorro. Se ha optado por emplear un compromiso entre tiempo de cálculo y el tamaño de mallado usado, obteniéndose buenos resultados en la mayoría de los parámetros. Sin embargo, la simulación de la interacción aire-agua no es completamente satisfactoria.

La estimación de condiciones en la condición inicial (intensidad de la turbulencia, T_u) es esencial en la caracterización de las acciones hidrodinámicas de los disipadores de energía. Se sugiere calcular T_u en la escala del modelo (por ejemplo, escala 1:40) con la metodología paramétrica y mantener este valor en el cálculo en prototipo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER a través del proyecto "Aireación natural de flujos en el vertido libre por coronación de presas y su difusión en cuencos de disipación de energía hidráulica" (BIA2011-28756-C03-02).

Referencias

Annandale, G.W. 2006. *Scour Technology*. McGraw-Hill, N.Y, USA.

ANSYS, Inc. 2010. *ANSYS CFX. Reference Guide*. Release 13.0.

Armengou, J. 1991. *Vertido libre por coronación presas bóveda. Análisis del campo de presiones en cuenco amortiguador*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Bollaert, E., Schleiss, A. 2003. *Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review*. Journal of Hydraulic Research, 41 (5), 451-464.

Castillo, L. 1989. *Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóveda*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Castillo, L., Puertas, J., Dolz, J. 1999. *Discussion about pressure fluctuations on plunge pool floors*. Journal of Hydraulic Research, 37 (2), 272-788.

Castillo, L. 2002. *Parametrical analysis of the ultimate scour and mean dynamic pressures at plunge pools*. Proceedings École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland. Schleiss & Bollaert (eds). A.A. Balkema.

Castillo, L. 2006. *Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools*. Proceeding The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), IAHR, ASCE, Drexel University. College of Engineering. DSpace Digital Lybrary. DU Haggerty Library. Philadelphia, USA.

Castillo, L. 2007. *Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool*. Proceeding 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research, Venice, Italy, 2, 645-655

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*, 45 (6), 715-723.

Castillo, L., Carrillo, J.M. 2011. *Numerical simulation and validation of hydrodynamics actions in energy dissipation devices*. Proceeding 34th IAHR World Congress. International Association of Hydro-Environment Engineering and Research, Brisbane, Australia.

Castillo, L., Carrillo, J.M. 2012. *Hydrodynamics characterization in plunge pools. Simulation with CFD methodology and validation with experimental measurements*. Proceeding 2nd IAHR European Congress. International Association of Hydro-Environment Engineering and Research, Munich, Germany.

Cui Guang Tao, Lin Ji Yong and Liang Xing Rong, 1985. *Study on the force and effect of the Arch dam overflow water tongue on the river bed*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Beijing, 8, 53-68 (in Chinese).

Ervine, D.A., Falvey, H.R. 1987. *Behavior of turbulent jets in the atmosphere and plunge pools*. Proceedings of the Institutions of Civil Engineers, Part. 2, 83, 295-314.

Ervine, D.A., Falvey, H.T., Withers, W.A. 1997. *Pressure fluctuations on plunge pool floors*. *Journal of Hydraulic Research*, 35 (2), 257-279.

Ho, D.K.H., Riddette, K.M. 2010. *Application of computational fluid dynamics to evaluate hydraulic performance of spillways in Australia*. *Australian Journal of Civil Engineering*, 6 (1), 81-104.

Puertas, J. 1994. *Criterios hidráulicos para el diseño de cuencos de disipación de energía en presas bóveda con vertido libre por coronación*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Scimeni, E. 1930. *Sulla forma delle vene tracimanti*. *L'Energia Elettrica*, Aprile, 293-305 (in Italian).