

Evaluación de un separador de caudales para alcantarillado combinado aplicando la metodología CFD

Evaluation of flow separator for combined sewer system applying CFD methodology

(Recepción 04/03/2019; Aceptación 02/07/2019)

Santamaría J.¹; Hidalgo X.¹; Ortega P.¹; Casa E.¹; Vera P.¹; Galarza J.¹.

¹Escuela Politécnica Nacional

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador

Av. Ladrón de Guevara y Andalucía

Teléfono: (+593) 2 2976300

Email: jorge.santamaria@epn.edu.ec

Resumen. En alcantarillados combinados antes de su descarga en los ríos es necesario separar los caudales sanitarios y los caudales pluviales mediante estructuras separadoras de caudal. Estas estructuras separan el caudal sanitario proveniente de las ciudades y lo transportan hacia las plantas de tratamiento. En ciudades andinas debido a su fuerte topografía muchas veces estas estructuras funcionan en régimen supercrítico y altas velocidades. Para el presente estudio se analizó un diseño de separador de caudales muy utilizado en la ciudad de Quito con ayuda de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), metodología ampliamente utilizada en el diseño, evaluación y optimización de estructuras hidráulicas.

Palabras clave. Separador de caudales, alcantarillado combinado, CFD, RNG k-ε, ciudades andinas.

Abstract. In combined sewer system before their discharge into rivers, it is necessary to separate urban wastewater flows and rainwater flows by means of flow separation structures. These structures separate the sanitary flow coming from the cities and it is transported to the treatment plants. In Andean cities, due to their abrupt topography, these structures often operate in a supercritical regime and high speeds. For the present study, a flow separator very common in Quito was analyzed with Computational Fluid Dynamics (CFD), methodology used in the design, evaluation, and optimization of hydraulic structures.

Keywords. Flow separator, Combined Sewer Overflow CSO, CFD, RNG k-ε, Andean cities.

1. Introducción

Actualmente, en muchas ciudades existen sistemas de alcantarillado combinado que descargan sus aguas directamente a los ríos (Guhl et al, 2010). Gracias a un cambio de legislación es obligatorio depurar el caudal sanitario antes de la descarga. Para cumplir este propósito es necesario una estructura separadora de caudales combinados. Muchas ciudades están implantadas en la región andina, cuyas características son pendientes fuertes y una topografía abrupta. Esto ha ocasionado que gran parte de los sistemas de alcantarillado tengan pendientes fuertes y trabajen siempre en un régimen supercrítico (Froude >1.0).

Gracias al avance y desarrollo en computación, hoy en día la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una metodología accesible y ampliamente utilizada, siempre y cuando el modelo numérico sea validado y calibrado previamente. Los softwares CFD resuelven con gran aproximación la interacción de flujos con estructuras hidráulicas presentando un

sinnúmero de resultados que no se pueden obtener en el modelo físico por el grado de detalle (Ortega, 2015).

El propósito del presente trabajo es utilizar las ventajas de la metodología CFD para evaluar el funcionamiento hidráulico de una estructura separadora de caudales combinados y como afecta la pendiente de aproximación y el flujo en régimen supercrítico a la estructura hidráulica.

2. Metodología

2.1 Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a un diseño de separador de caudales muy utilizado en la ciudad de Quito-Ecuador. Tiene un canal de aproximación de sección 1.80 m x 1.80 m y 2.87 % de pendiente longitudinal. En la zona de separación (al final del canal combinado) se sitúan: un umbral transversal trapezoidal de 0.6 m de alto x 2.0 m y hacia la margen izquierda un orificio rectangular de 0.6 m de alto x 1.9 m de ancho que descarga en el canal

sanitario de sección 1.2 m x 1.2 m y pendiente del 1% (EPMAPS 2012). Finalmente, a continuación del umbral inicia el canal de descarga hacia el río o cauce natural denominado canal pluvial de sección 2.0 m x 2.0 m y 0.47% de pendiente longitudinal. La Figura 1 presenta una vista tridimensional del separador de caudales analizado.

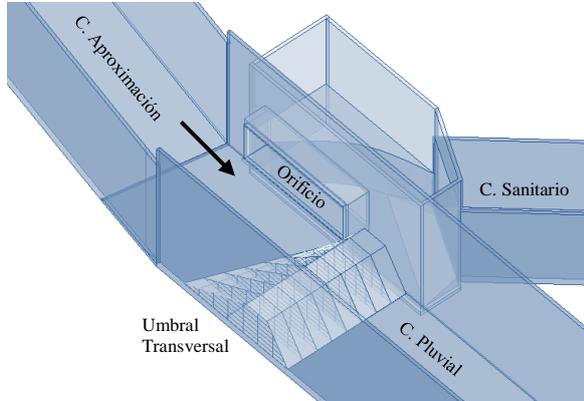


Figura 1. Vista tridimensional del separador de caudales, pendiente de aproximación 2.87 %, ancho canal 1.80 m, orificio rectangular lateral 0.60 m x 1.90 m en prototipo.

2.2 Modelo numérico

Para la simulación numérica se utilizó el software comercial de Dinámica de Fluidos Computacional ANSYS CFX 16.0. Este software utiliza el método de volúmenes finitos para la resolución de las ecuaciones conservativas utilizando la aproximación de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes mejor conocidas como ecuaciones RANS, modelo que obtiene hasta un 90% de precisión en las variables medias del flujo (Viti, 2018). Para la solución del problema de cierre se utiliza un modelo de turbulencia de dos ecuaciones RNG k-ε, método ampliamente evaluado y considerado como el más ventajoso al momento de representar un fenómeno hidráulico (Sadegh et al., 2016; Dargahi, 2010; Bayon et al., 2017).

Para la discretización del dominio computacional se ha utilizado un mallado estructurado con elementos hexaédricos, el cual presenta mejores resultados que los elementos tetraédricos en la convergencia de la solución numérica, reduciendo el número de elementos considerablemente (Carrillo y Castillo, 2011). El análisis de convergencia de malla fue realizado utilizando la metodología del índice de convergencia de malla (CGI). A partir de una relación de refinamiento constante (r) y de los valores de las variables (caudal pluvial $Q_{p,Ansys}$, caudal sanitario $Q_{s,Ansys}$), la metodología establece un orden de convergencia (p), realiza la extrapolación de Richardson ($Q_{h=0}$), calcula los índices de convergencia (GCI) y verifica el rango de convergencia asintótico (NASA, 2008). Como se puede observar en la Tabla 2, los valores de verificación cercanos a 1 confirman el rango de

convergencia asintótico y por consiguiente la independencia de malla.

Se establece 0.01 m para el tamaño del elemento, valor que como se observa en la Tabla 1 y Tabla 2 es independiente de la densidad de malla y no demanda una cantidad excesiva de recursos en el procesamiento, teniendo un total de 840 531 elementos y una relación de aspecto promedio de 1.37.

Tabla 1. Comparación entre diferentes tipos de mallado.

| Mallado | $Q_{p,Ansys}$ | $Q_{s,Ansys}$ | Tamaño del elemento | Elementos | Tiempo total de simulación |
|---------|---------------|---------------|---------------------|-----------|----------------------------|
| | l/s | l/s | m | # | horas |
| A | 78.100 | 12.550 | 0.01 | 840 531 | 12 horas |
| B | 78.974 | 12.101 | 0.0075 | 1 982 325 | 27 horas |
| C | 78.565 | 12.170 | 0.005 | 2 787 312 | 36 horas |

Tabla 2. Resultados del análisis de convergencia de malla.

| | Q_p Ansys | Q_s Ansys |
|---------------------|--------------|--------------|
| r | 1.414 | 1.414 |
| p | 2.187 | 5.425 |
| r^p | 2.134 | 6.555 |
| $Q_{h=0}$ | 78.926 l/s | 12.182 l/s |
| GCI - BC | 0.575 % | 0.127 % |
| GCI - AB | 1.221 % | 0.835 % |
| Verificación | 0.995 | 1.006 |

Las condiciones de contorno utilizadas corresponden a los datos medidos en un modelo físico a escala 1:5 construido en el Laboratorio del CIERHI, el modelo utiliza el criterio de similitud de Froude. Como condición inicial se utiliza el caudal y calado medido en el tramo de aproximación y la salida corresponde a una condición abierta a la atmósfera (Presión = 0).

3. Análisis de resultados

Los caudales combinados (Q_c) son derivados en un caudal sanitario (Q_s) que va directamente a la planta de tratamiento y un caudal pluvial (Q_p) que se descarga al río o cuerpo receptor (Andrade 2012). En la Tabla 3 se indica los caudales derivados tanto en el modelo físico (Lucero y Santamaría, 2018) como en el modelo numérico CFD en ANSYS CFX.

Tabla 3. Caudal sanitario Q_s , Caudal pluvial Q_p y Caudal total Q_c en Modelo físico escala 1:5 (Subíndice MF) y Simulación Numérica ANSYS CFX 16.0 (Subíndice Ansys).

| Simulación | $Q_{s,MF}$ (l/s) | $Q_{s,Ansys}$ (l/s) | $Q_{p,MF}$ (l/s) | $Q_{p,Ansys}$ (l/s) | $Q_{c,MF}$ (l/s) | $Q_{c,Ansys}$ (l/s) |
|------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| A1 | 9.58 | 8.35 | 0.00 | 0.00 | 9.58 | 8.35 |
| A2 | 10.67 | 9.21 | 0.00 | 0.00 | 10.67 | 9.21 |
| A3 | 6.51 | 6.11 | 41.47 | 39.48 | 47.98 | 45.60 |
| A4 | 7.96 | 8.00 | 52.90 | 50.16 | 60.86 | 58.16 |
| A5 | 14.32 | 12.55 | 78.74 | 78.10 | 93.06 | 90.65 |

Como se puede observar en la Figura 2 y Figura 3, el modelo numérico reproduce el comportamiento de flujo obtenido en el modelo físico con las condiciones iniciales antes descritas. La Figura 2 presenta los valores de caudal pluvial y la Figura 3 presenta los

valores de caudal sanitario tanto para modelo numérico como para modelo físico. Se puede notar que tanto la pendiente de la línea de tendencia como el coeficiente R^2 son cercanos a uno lo que quiere decir que los valores difieren dentro de un rango aceptable.

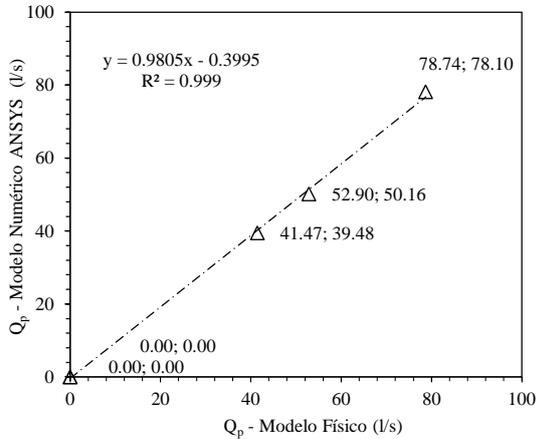


Figura 2. Correlación entre los valores de caudal pluvial obtenidos en modelo físico y modelo numérico.

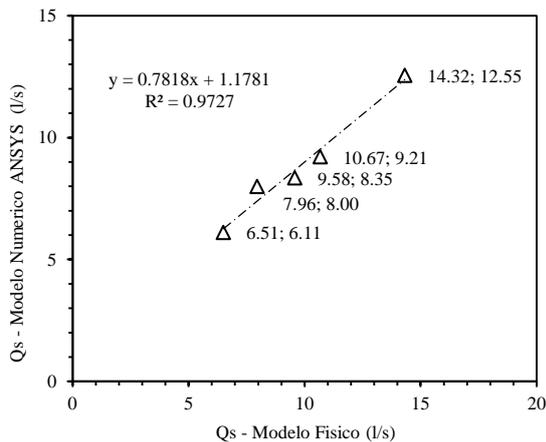


Figura 3. Correlación entre los valores de caudal sanitario obtenidos en modelo físico y modelo numérico.

Para caudales del orden de 10 l/s a 25 l/s equivalentes únicamente al caudal sanitario en época de verano la pared de cierre funciona correctamente. La pared desvía todo el caudal hacia el orificio rectangular lateral como se puede evidenciar en la Figura 4. Para caudales mayores (época de invierno) existe una separación de caudales, sin embargo, el flujo llega con alta velocidad y parte de este choca en la arista lateral del orificio.

En la Figura 5 se puede observar los resultados del modelo ANSYS CFX para un caudal de 9.58 l/s. Gracias al nivel de detalle del modelo numérico se evidencia zonas muertas de baja velocidad que podrían a futuro ocasionar problemas de sedimentación, sobre todo en épocas de verano.

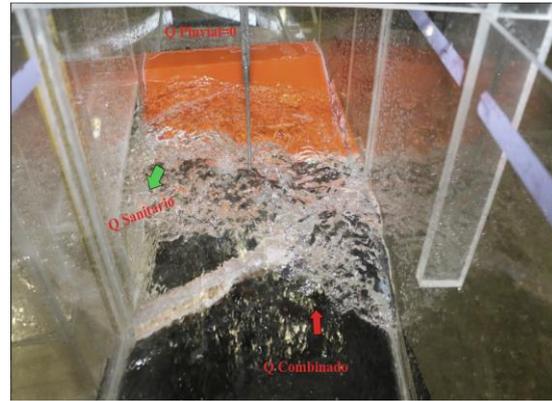


Figura 4. Modelo Físico escala 1:5, vista superior Q_s=9.58 l/s,

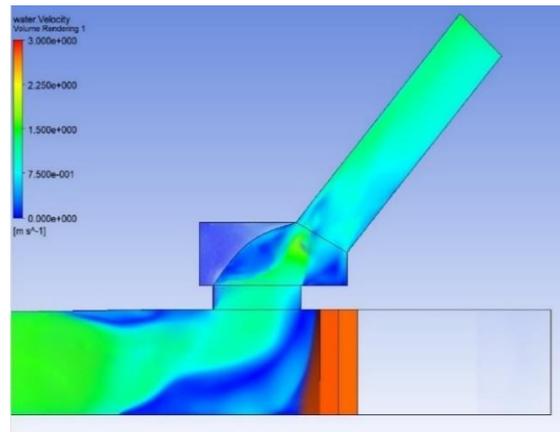


Figura 5. ANSYS CFX, Velocidades Q=9.58 l/s, Fr=3.27, Q_s=9.58 l/s, Q_p=0.0 l/s.

Uno de los aspectos evidenciados en el modelo físico es que, para caudales máximos se observa un choque del flujo en la arista recta del orificio rectangular lateral. Se vio la importancia de analizar las presiones para todo el rango de caudales con ayuda del modelo numérico CFD. En la Figura 6 se indica las presiones obtenidas a distintas alturas del orificio rectangular lateral y en el centro del umbral.

Es necesario señalar que el funcionamiento del separador de caudales en época de invierno (caudales mayores) no es el adecuado. El funcionamiento está directamente relacionado con la pendiente de aproximación del colector, flujos en régimen supercrítico y números de Froude altos (Froude ≈ 3.5).

Como continuación del presente trabajo se deberá proponer una optimización al diseño utilizando las ventajas conjuntas del modelo físico escala 1:5 (Lucero y Santamaría, 2018) y de la metodología CFD (Ortega, 2015), planteando varias alternativas y adicionalmente considerando un análisis de concentraciones y balance de masas para la parte sanitaria (Calderón, 2017).

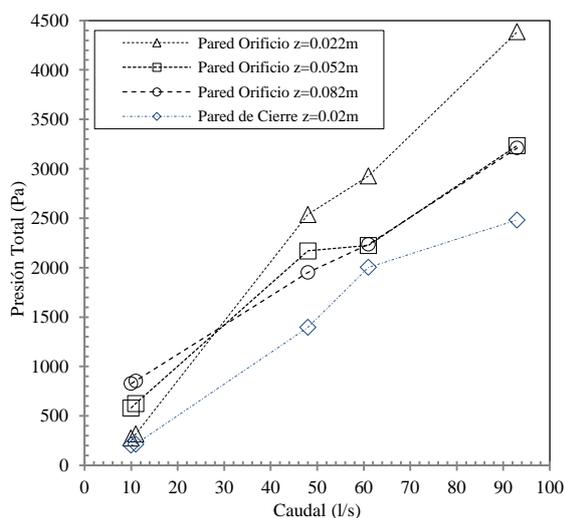


Figura 6. Presiones obtenidas en ANSYS CFX en la pared orificio y en la pared de cierre.

3. Conclusiones

Las estructuras separadoras de caudal son obras muy importantes en los sistemas de alcantarillado combinado. En ciudades andinas debido a las pendientes topográficas fuertes muchas estructuras deben trabajar con flujos en régimen supercrítico. La metodología CFD es una herramienta muy útil para evaluar el comportamiento hidráulico de una estructura. El paquete comercial ANSYS CFX y el modelo de turbulencia RNG k- ϵ reproduce el flujo de manera similar al ensayado en el modelo físico.

El separador de caudales evaluado funciona correctamente hasta un rango de caudales de 50 l/s, para caudales mayores debido a las altas velocidades se produce un choque en la parte lateral del orificio rectangular. El modelo numérico permite evaluar las presiones en esos puntos, ya que presiones demasiado altas pueden ocasionar daños en el hormigón de la estructura a corto y mediano plazo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI-EPN de la Escuela Politécnica Nacional por las facilidades y financiamiento brindado para la ejecución del proyecto de investigación.

Referencias

Andrade, L. (2012). "Diseño de la Red Metropolitana Ambiental de la Calidad del Recurso Hídrico, diagnóstico" Secretaría de Ambiente del DMQ.

Bayón, A., Toro, J., Bombardelli, F., Matos, J., López P. (2017). "Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways" *Journal of Hydro-Environment Research* 2017; 19:137-149.

Calderón, D. (2017) "Modelación física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas en Ecuador. Caso de descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito" *Tesis Maestría*. Instituto de Ingeniería Sanitaria, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Carrillo, J. Castillo L. (2011). "Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional" IV Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT, Cartagena, España, pp. 33-35.

Dargahi, B. (2010). "Flow characteristics of bottom outlets with moving gates" *Journal of Hydraulic Research* 2010; 48:4, 476-482.

EPMAPS, (2012). "Estudios y Diseños Definitivos de los Sistemas de Alcantarillado de los Interceptores en el Río Machángara, Quebrada Caupicho" Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento.

Guhl, E., Montes, P., Encalada, G. (2010). "El agua de los Andes" Ed. Comunidad Andina. ISBN: 978-612-4054-31-0

Lucero, C. Santamaría, J. (2018). "Estudio experimental en modelo físico de una estructura separadora de caudales con umbral transversal, orificio lateral y régimen de aproximación supercrítico, caso de estudio "Quebrada Caupicho" *Tesis Ingeniería*. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

National Aeronautics and Space Administration, NASA (2008). "Examining Spatial (Grid) Convergence", <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html> (Recuperado: 05/06/2019)

Ortega, P. (2015) "Simulación Numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD aplicando el paquete computacional ANSYS CFX." *Tesis Maestría*. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

Sadegh, D., Abbas, P. (2016) "Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran" *Alexandria Engineering Journal* 2016; 55:467-473

Viti, N., Valero, D., Gualtieri, C. (2018). "Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook" *Water* 2018, 11:1.